

Nesta nova e genial alegoria da física, os eternos personagens de *O mágico de Oz* — Dorothy, o Espantalho, o Homem de Lata e o Leão — enfrentam o desafio de compreender, e explicar, o mundo das subpartículas atômicas.

Quer esteja descrevendo a constante de Planck, a superposição, o tunelamento ou os quarks e os léptons, Robert Gilmore é um mestre na arte de tornar compreensíveis e divertidos os conceitos da física moderna.

"Gilmore tem consciência de que seu campo de conhecimento freqüentemente intimida os que o observam de fora. Para contornar esse problema, ele recorre às histórias infantis para ajudarem-no a comunicar os conceitos que governam a física moderna."

Science News

"***O mágico dos quarks*** é um livro tanto para o jovem cientista quanto para o leitor que anseia por compreender melhor o estranho mundo das partículas subatômicas. Dando continuidade a *Alice no País do Quantum*, Gilmore evoca o familiar mundo de Oz, guiando Dorothy e seus amigos por um mundo mágico no qual os mistérios das forças e partículas da mecânica quântica são revelados."

IEEE Spectrum

LEIA TAMBÉM DO MESMO AUTOR:

Alice no País do Quantum
A física quântica ao alcance de todos





JZE

ISBN 85-7110-631-2

O Mágico dos Quarks

ROBERT GILMORE

A física de partículas ao alcance de todos



Depois do sucesso de *Alice no País do Quantum* – um campeão internacional de vendas – Robert Gilmore, o mestre da alegoria científica, utiliza aqui os personagens de *O mágico de Oz* para explicar de maneira clara e divertida conceitos da física de partículas.

O primeiro dia de visita de Dorothy à cidade começa de maneira bastante monótona, numa viagem de metrô com o tio Henry e a tia Em. De repente, o vagão de metrô em que ela se encontra dispara. Os trilhos e paredes do túnel se transformam, depois desaparecem e, quando menos espera, Dorothy tem a impressão de estar caindo, despencando, até que pousa suavemente numa paisagem de flores, campinas, relvas e árvores.

Assim se iniciam as aventuras de Dorothy pelo mundo das partículas subatômicas. Os sucessivos encontros com seus companheiros de percurso – o Espantalho Observador, o Sabichão de Lata e o Leão Confiante – e com terríveis feiticeiras vão pouco a pouco esclarecendo os conceitos que sustentam os fundamentos da física moderna.

Diz-se por vezes que a "luz fria" da ciência destrói a fantasia, que não se pode achar o mundo extraordinário quando

O Mágico dos Quarks



Robert Gilmore

O Mágico dos Quarks

A física de partículas ao alcance de todos

Tradução:
Maria Luiza X. de A. Borges

Revisão técnica:
Alexandre Cherman
Astrônomo da Fundação Planetário do Rio de Janeiro

Jorge Zahar Editor
Rio de Janeiro

Para toda a minha família,
em particular os recém-chegados.

Título original:
The Wizard of Quarks:
A fantasy of particle physics

Tradução autorizada da primeira edição
publicada em 2001 por Copernicus Books,
imprint de Springer-Verlag, Inc., parte do grupo Bertelsmann Springer

Jorge Zahar Editor Ltda.
rua México 31 sobreloja
20031-144 Rio de Janeiro, RJ
tel.: (21) 2240-0226 / fax: (21) 2262-5123
e-mail: jze@zahar.com.br
site: www.zahar.com.br

Capa: Sérgio Campante

CIP-Brasil. Catalogação-na-Fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

G398m
Gilmore, Robert, 1941-
O mágico dos quarks: a física de partículas ao alcance de todos/Robert Gilmore; tradução, Maria Luiza X. de A. Borges. — Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2002

Tradução de: The wizard of quarks: a fantasy of particle physics
ISBN: 85-7110-631-2

1. Partículas (Física nuclear) — obras populares. I. Título. II. Título: A física de partículas ao alcance de todos.

CDD 539.72
CDU 539.12
02-0080

Sumário

PREFÁCIO

O Mundo das Maravilhas

Diz-se por vezes que a "luz fria" da ciência destrói um senso de deslumbramento — que não se pode achar o mundo extraordinário quando se sabe que são apenas átomos. Apenas átomos! Isso é como dizer que não se pode apreciar as obras de Shakespeare, a Bíblia, ou mesmo o *National Enquirer*, porque não passam de palavras. Tudo depende do que foi feito com as palavras ou os átomos.

Ainda que os átomos em si mesmos lhe pareçam frios, enfadonhos e totalmente desprovidos de interesse (uma noção que eu contestaria energicamente), isso não significa que um mundo composto de átomos deva ser em algum grau menos maravilhoso do que um feito de outra espécie de matéria misteriosa, indeterminada. Pense em um centavo. Não é possível fazer muita coisa com ele, não é? Agora pense em um bilhão de centavos: dez milhões de dólares. De repente o assunto se torna mais interessante. Por fim, pense numa quantidade mil vezes maior que essa. Agora as possibilidades parecem inesgotáveis, limitadas apenas por sua imaginação.

Agora pense não num centavo mas num átomo. Um átomo em si é uma maravilha, como espero mostrar, mas ainda que um único átomo não desperte grande interesse, as possibilidades se multiplicam quando se trata de muitos. Pense num número muito maior que a quantidade de mil bilhões que tornou os centavos fascinantes no exemplo anterior. Pense num número cerca de dez mil trilhões de vezes maior. Números como esse são um desafio ao entendimento, mas tal quantidade de átomos pode fazer muitas coisas. Os átomos poderiam se combinar para produzir você ou eu, por exemplo. Poderiam construir qualquer criatura, artefato ou maravilha natural que você pudesse imaginar, desde que fossem aproximadamente do tamanho de uma pessoa. Objetos maiores requerem ainda mais átomos, é claro. Já não podemos dizer que as possibilidades são limitadas somente por sua imaginação. Além de constituir qualquer coisa que você pudesse imaginar, átomos poderiam se combinar para produzir todo o número imensamente maior de coisas que você *não* seria capaz de imaginar.

Uma das mensagens da ciência é que o Universo *não* está restrito ao que podemos imaginar. Algumas descobertas, como a mecânica quântica, estão muito além de nossas imaginações. Há mais coisas no Céu e na Terra do que sonha nossa filosofia, e uma das maravilhas da ciência é ter-nos mostrado algumas delas.

A ciência só pode servir para aumentar nosso senso de deslumbramento; ela é "valor agregado". Dá-nos novos pensamentos, novas idéias com que nos maravilhar. Não posso acreditar que um senso de deslumbramento requeira que sejamos ignorantes e que a maravilha se desvaneça em face do conhecimento. Se é assim, trata-se de um tipo mesquinho de sentimento. Ao contrário, a compreensão pode nos assombrar e intensificar enormemente nossa admiração.

Não consigo entender!

Parece que muitas vezes as pessoas não admitem que as descobertas da ciência possam ser maravilhosas e assombrosas. Vez por outra pessoas me dizem que não conseguem compreender o que estou tentando lhes dizer em meus livros. Certamente isso pode acontecer porque não expliquei o material com eficácia. Isto é perfeitamente possível, mas desconfio que em muitos casos acontece por causa da compreensão que essas pessoas têm da palavra *compreender*.

Penso que, freqüentemente, o que as pessoas querem dizer com *compreender* é que, quando alguma coisa lhes foi explicada, elas deveriam se dar conta de que aquilo "faz sentido" — que é uma resultante razoável do que já sabiam e em que já acreditavam. Não se pode esperar isso, no entanto, quando se está olhando para algo realmente novo. O que descobrirmos será estranho, será surpreendente, e muitas vezes será de aceitação muito difícil. O velho ditado segundo o qual não há nada de novo sob o Sol simplesmente não é verdadeiro. Ainda *não* sabemos tudo.

Quando examinamos uma situação totalmente nova, podemos esperar descobrir coisas totalmente novas. Essas descobertas não irão necessariamente "fazer sentido" nos termos do que já sabemos. Podem até violar nosso "senso comum", porque não temos nenhuma experiência prévia em que nos pautar. O senso comum é uma espécie de consenso destilado da experiência acumulada de nossas vidas, e em situações relativamente comuns é um guia confiável. Mas o mundo quântico não faz parte da nossa experiência comum, como aliás tampouco o faz o mundo descrito pela teoria da relatividade, em que os objetos se movem a velocidade quase igual à da luz. Nossa intuição, sendo derivada de nossa experiência, não nos ajuda aqui. Não temos nenhum direito a quaisquer

idéias preconcebidas, e certamente não temos nenhum direito a impor quaisquer precondições para o que a Natureza deve ser. Quando encontramos alguma coisa que está *totalmente* fora de nossa experiência prévia, devemos nos tornar como criancinhas, aprendendo sobre o mundo de novo. Os bebês (pelo que sei) não têm idéias preconcebidas sobre o mundo; devem ser capazes de entendê-lo partindo do zero. Da mesma maneira, temos de nos tornar físicos quânticos "nascidos de novo".

Não criamos o mundo e não nos compete ditar as regras da Natureza. O que é, é, seja o que for. Não podemos fazer nada senão descobrir, tentar descrever e, acima de tudo, maravilhar-nos com isso. O deslumbramento é a resposta apropriada, não a incredulidade ou a determinação rígida de fazer com que tudo se encaixe no que já sabemos ou naquilo em que já acreditamos.

Uma abordagem científica

Devo admitir que este livro não é científico. E não porque procuro transmitir um senso de deslumbramento; isso vai de par com a prática da ciência. E também não, apresso-me a acrescentar, pelo fato de a descrição do mundo das partículas que tentei traçar não ser uma descrição que os cientistas contemporâneos subscrevem; até onde tenho controle, ela é. O que está faltando são as provas experimentais. Neste livro usei analogias para fazer muitas afirmações acerca da natureza das partículas; mas não forneci nenhuma prova para apoiá-las. A ciência, em contraposição, depende do experimento. Não temos nenhum conhecimento inato de como o universo deve ser e precisamos descobrir por observação.

Muitas das descobertas da ciência — e da física quântica em particular — soam de fato totalmente implausíveis, mas temos de viver com elas porque a explicação do mundo que fornecem é a única que está de acordo com a observação. Essa é a primeira e a última exigência da ciência, e é por isso que os cientistas, que são tão propensos a discordar entre si quanto qualquer outro grupo de indivíduos teimosos, acabam por chegar a um acordo e a se convencer todos da *mesma coisa*. Nossos modelos, portanto, devem corresponder ao que vemos, devem ser compatíveis com tudo que vemos, e (quando possível) devem prever aquilo que ainda não examinamos. Não estamos falando de um ou dois experimentos sensacionais. Não é assim que a ciência funciona. A idéia de um "experimento monumental" é indesejável (embora por vezes o custo limite o número de observações, como o faz na física de partículas). A maior parte da física é sustentada não por uma única observação, mas por milhares — e mais pro-

vavelmente milhões — de observações feitas ano após ano. Essas observações são registradas por todo um exército de experimentadores, entre os quais os cientistas em grandes laboratórios nacionais, pesquisadores nas universidades, e professores e estudantes nos laboratórios das escolas secundárias. A visão física do mundo aceita tem de concordar com as mensurações que todos eles fazem. Tem de concordar com cada uma dessas mensurações, e, é claro, deve também concordar com o que todos nós observamos em nossas vidas cotidianas. Muitas vezes as teorias podem prever corretamente os resultados de observações antes que elas sejam realizadas. O peso absoluto e esmagador de todas essas provas torna difícil a sustentação de concepções alternativas.

Já foi dito que experimentar o deslumbramento da ciência é como deleitar-se numa maravilhosa sala de banquetes a que só se tem acesso por uma longa e lúgubre cozinha. A cozinha representa o processo de realização e interpretação de experimentos. Esse processo pode ser complicado e entediante, mas somente a experimentação nos faz acreditar nas conclusões da ciência. Neste livro, eu o convido a entrar no salão e lhe dou uma prova das maravilhas que compõem o banquete, mas é importante lembrar que somente visitando a cozinha você poderá se certificar de que é seguro comer as iguarias do banquete — de que as maravilhas são realmente verdadeiras. Devemos todas as iguarias que vamos saborear ao trabalho científico meticuloso que foi executado — e continua a ser mesmo enquanto jantamos — na cozinha.

... E há uma abundância de maravilhas

Não falta, na representação atual do mundo atômico e subatômico, o que despertar surpresa e maravilhamento. A saber...

1. Há o efeito predominante da *interferência* (capítulo 2). No nível atômico, os conceitos cotidianos de partícula e onda deixam de ser apropriados. Em vez deles, há *amplitude*, algo que não se entrosa bem com nossa experiência cotidiana. Nesse mundo não há escolhas. Há uma amplitude presente para tudo que *poderia* acontecer, e todas as amplitudes interferem. Elas somam *e subtraem*, de modo que é o conjunto total das interferências que determina o que você provavelmente observará.
2. Há o papel onipresente da *fase* (capítulo 2). Classicamente, fase é algo "semelhante a uma onda". Descreve algum tipo de orientação relativa das diferentes amplitudes e determina como elas se afetam umas às outras, se somam ou subtraem ou alcançam alguma solução de meio-termo. A fase é vital.
3. Há *flutuações quânticas* (capítulo 3), como descritas pelo Princípio da Incerteza. Muitas quantidades — em particular, momento e energia — podem variar um pouco. A energia total é constante a longo prazo, mas flutua ao longo de períodos breves.
4. *Partículas virtuais* (capítulo 8) nascem de flutuações de energia. Quanto mais curto o período ao longo do qual é considerada, mais a energia pode variar. Ao longo de períodos muito curtos, ela pode variar o bastante para criar a energia de massa em repouso de novas partículas. Essas partículas virtuais podem nascer do nada e retornar ao nada, mas em sua existência efêmera elas são responsáveis por todas as interações que mantêm nosso mundo coeso.
5. O Princípio da Exclusão de Pauli (capítulo 4) emerge da distinção entre partículas cuja amplitude muda de sinal quando quaisquer duas dessas partículas são trocadas e partículas cujas amplitudes não sofrem essa mudança. Seria este um pormenor acadêmico que por sua relevância ficaria abaixo do debate medieval sobre o número de anjos que poderia dançar na cabeça de um alfinete? Ao contrário, isso tem conseqüências interessantes, como a existência de átomos e o fato de você não afundar no chão.
6. *Renormalização* (capítulo 6) é uma tentativa de lidar com a energia infinita que deveria acompanhar o conjunto infinito das partículas virtuais permitidas pelo item 1 desta lista. De fato, a energia das partículas está enterrada num buraco infinitamente profundo, com apenas sua energia de massa em repouso observada despontando na superfície.

... e tudo isso aparece antes mesmo que cheguemos aos *quarks*.

Eu o convido a entrar, sentar-se confortavelmente e participar desse banquete que é uma compreensão fundamental do mundo que todos habitamos.

1

A Bruxa da Massa

O vagão do metrô deu uma guinada brusca.

Isso por si só não era surpreendente, pois toda a viagem parecera a Dorothy um bocado tumultuada. Seus tios Henry e Em tinham tido uma colheita de milho particularmente boa aquele ano e tinham decidido comemorar na Cidade Grande. Assim, cá estavam eles e, naturalmente, estavam fazendo uma viagem de metrô. Mal haviam se instalado em seus assentos, descobriram que as pessoas sentadas em frente também vinham do Kansas e logo todos os quatro adultos estavam profundamente mergulhados numa discussão sobre o preço do milho.

Apesar de querer tanto bem à tia e ao tio, Dorothy há algum tempo já sentia que devia haver mais coisas na vida que o preço do milho. Não demorou a ficar entediada e se afastou para investigar o trem. Isso não lhe tomou muito tempo; era uma hora calma do dia, o trem não estava lotado e um vagão semivazio de metrô é muito parecido com o outro. Por fim achou um vagão completamente vazio, aboletou-se num dos lugares vagos e ficou olhando pela janela. Também ali, é preciso confessar, não havia muito para ver. Cabos intrigantes abraçavam as paredes do túnel, e vez por outra uma estação iluminada emoldurava a afobação de pessoas entrando e saindo dos vagões. De vez em quando, a entediante extensão de túnel era aliviada por uma curta passagem lateral forrada de canos e cabos e terminando numa parede de concreto, diante da qual uma escada subia para invisíveis regiões superiores. Dorothy ficou pensando no que poderia haver no alto das escadas, mas não havia como saber, e cada passagem lateral desaparecia rapidamente de vista. O que via pela janela era sobretudo escuridão e seu próprio reflexo. Foi então que aconteceu aquela guinada brusca.

Até esse momento, o trem vinha chacoalhando e rangendo enquanto rolava sobre os trilhos, mas seus solavancos e guinadas ocasionais não tinham sido nada perto disso. Tinham sido as guinadas comuns de todo dia, não uma guinada ardilosa, contorcida, do tipo "você acaba de tropeçar numa descontinuidade no contínuo espaço-tempo e o melhor que tem a fazer é reajustar sua percepção do Universo".

Aquela foi uma *dessas* guinadas.

Em seguida o trem continuou a correr de modo bastante suave — muito mais suave do que antes, a bem da verdade. As paredes do túnel pareciam mais lisas também, embora continuasse escuro lá fora e fosse difícil para Dorothy ter certeza. O trem passou por um outro túnel lateral e, ao olhar de relance para ele, Dorothy notou uma diferença em relação a todas as passagens laterais que vira até então. Antes, os túneis estavam forrados de cabos e podia-se ver uma escada no fim. *Esse* túnel tinha laterais lisas, sem características marcantes, e terminava num círculo resplandecente de luz com um contorno borrado. Lembrou-lhe a ocasião em que tinha olhado por um microscópio na escola. Através desse círculo de luz ela teve a impressão de estar olhando várias construções estragadas pelo tempo, todas dispostas num vasto e ondulante mar de milho. Sobre uma das construções projetava-se orgulhosamente um cata-vento na forma de um cavalo a galope. Embora o ponto de vista elevado fosse fora do comum, Dorothy se deu conta de que, surpreendentemente, estava olhando para a fazenda do tio: sua própria casa.

Não mais que um vislumbre e a visão foi varrida pelo movimento do trem que passava acelerado pelo fim do túnel. Após alguns momentos de escuridão do lado de fora da janela, Dorothy viu outro túnel. Era idêntico ao anterior em todos os aspectos, a não ser porque desta vez a lente circular no fim estava focalizada no tampo meticulosamente esfregado de uma mesa de cozinha de madeira. Além da mesa estava o que se parecia muito com a cozinha de sua própria casa lá no Kansas. O açucareiro havia sido derrubado e Dorothy viu, marchando determinadamente rumo à mesa e vindo dela, uma fileira de pontinhos que reconheceu como uma trilha de formigas.

Mais uma vez o trem deixou depressa a abertura, mas logo veio outra. No fim desse túnel, Dorothy só teve tempo para ver uma grande forma rígida com pernas angulares bem abertas. A cabeça coroada com antenas girou e parecia estar olhando para ela com grandes olhos compósitos de cada lado quando Dorothy a perdeu de vista.

Outro túnel e outra visão apareceram. Nesse ela viu o que parecia ser um arranjo interminável de esferas nebulosas, como um imenso número de bolas de plástico desfocadas reunidas em duas cordas grossas entrelaçadas uma na outra. Não pôde apurar nenhum detalhe, mas era óbvio que cada uma daquelas esferas que faziam parte dessa hélice dupla estava em movimento, vibrando em torno de sua própria posição no arranjo. Algumas vibravam violentamente, outras de maneira mais suave, mas todas estavam em movimento e logo todas ficaram para trás à medida que o trem avançou.

A vista seguinte estava cheia de uma forma vaga, imprecisa. De certa maneira Dorothy teve a impressão de que o objeto que via era bastante complicado, mas a percepção que teve dele foi muito *incerta*.



Dorothy estava fascinada com essa sucessão de cineminhas relâmpago. Nunca lhe ocorrera que a Companhia de Metrô proporcionava esse tipo de diversão para seus passageiros. Como no interior do vagão a luz era pálida e cinzenta, e do lado de fora da janela, obviamente, era escuro a maior parte do tempo, as imagens eram uma distração bem-vinda. De repente, Dorothy se deu conta de que o persistente estrépito das rodas tinha cessado, e em seguida veio uma sensação de queda. A vista através das janelas já não era negra, mas de um cinza brumoso, com um brilho constante, como se ela e o vagão estivessem envoltos numa nuvem que estava começando a se dissipar.

Depois veio um choque tão repentino e intenso que, se não estivesse bem sentada, ela poderia ter se machucado. A queda terminara. A porta do vagão se abriu e a bruma evaporou rapidamente para revelar uma paisagem de maravilhosa beleza. Havia gramados encantadores e canteiros de flores deslumbrantes por toda parte — muito diferente da pedra cinza e seca da cidade. Tudo parecia estranho e brilhante a seus olhos, embora ela ainda tivesse a impressão de que, debaixo de tudo aquilo, até essa paisagem deslumbrante fosse de certa maneira, lá no fundo, sem cor.[1]

Dorothy correu para o gramado e olhou à sua volta. Seu olhar viajou sobre campinas, matas e flores. Olhou para todos os lados maravilhada e girou bem

1. O papel da *cor* na física de partículas é discutido no capítulo 9.



devagar, encantada com tudo que via. Quando se virou, seu olhar deparou subitamente com um elemento gritantemente incongruente. Isolada no meio desse idílio rural havia uma forma escabrosa, estranha: um único vagão de metrô, opaco, coberto de pichações e parecendo completamente deslocado naquele cenário. Contemplando essa visão desagradável, Dorothy ficou horrorizada ao observar, debaixo das rodas do vagão, um par de pernas grossas metidas numas meias listradas. Mal as avistara, elas se encolheram, e em seguida todo o pesado veículo *se ergueu ligeiramente.* Surgiu então uma figura engatinhando, flutuando, deslizando — realmente não há palavra que descreva adequadamente o modo como essa pessoa saiu de lá. Ela se deteve, suspensa no ar diante de Dorothy, com o semblante de alguém que está perfeitamente familiarizado com a *noção* de que as coisas normalmente tendem a cair e a ficar pousadas no chão, mas que simplesmente não acredita que noções desse tipose apliquem a *ela.* Sua posição era ainda mais sutilmente irritante porque seu corpo, o modo como seu cabelo caía, as pregas de sua roupa — tudo nela — estava alinhado de modo ligeira, mas definitivamente, enviesado. Agora que Dorothy a podia ver bem, revelava-se uma mulher de amplas, para não dizer enormes, dimensões. Olhava para Dorothy tão severamente quanto os traços quase perdidos em seu grande rosto redondo o permitiam.

— Ah, minha menina. Foi você a responsável pela queda dessa "carruagem" em cima de mim?

— Oh, não, senhora. Pelo menos, acho que não. Eu estava simplesmente andando de metrô, entende...

— Bem, não faz mal, não houve danos. Mas eu não cultivaria esse costume de deixar esses negócios de metrô caírem sobre as pessoas. Fosse outro, poderia ter ficado ferido, embora no meu caso, é claro, não houvesse perigo disso acontecer.

— E quem é a senhora, se posso perguntar? indagou Dorothy, fazendo uma pequena reverência por via das dúvidas.

— Oh, sou a Bruxa da Massa, a personificação da interação gravitacional. Isso é um outro nome para a força da gravidade, a força que mantém os planetas em suas órbitas e mantém você e os da sua espécie presos à superfície da Terra. Pode me chamar de G, se quiser. É como me chamam em geral.

— É realmente uma Bruxa? Dorothy perguntou, optando por enfrentar o conceito mais simples primeiro. — Acho que nunca conheci uma Bruxa antes.

— Com certeza você já me conhecia, ou melhor, já tinha experimentado os efeitos de minha interação de gravidade. Somos ao todo quatro bruxas, e cada uma de nós representa alguma forma de força ou interação experimentada pela matéria. De uma maneira ou de outra, você já viu os efeitos de todas essas interações, embora algumas delas possam não ter sido lá muito evidentes.

— Desculpe-me, disse Dorothy, sentindo-se bastante confusa, mas o que quer dizer por uma interação?





— Uma interação é a maneira pela qual uma partícula, um fragmento isolado de todo o corpo do Cosmo, pode ter qualquer efeito que seja sobre alguma de suas companheiras. Sabe, o mundo todo é composto de diferentes materiais — sólidos, líquidos e gases — que a envolvem em incrível profusão. Cada um deles pode lhe parecer ser uma coisa em si mesma, completamente uniforme e contínua em sua composição, mas não é. Nenhum deles é. Tudo que você vê, tudo que compõe o mundo à sua volta e o vasto universo além dele, até seu próprio corpo: tudo é feito de enormes números de partículas minúsculas. Você não percebe isso porque os números são realmente enormes e as partículas, minúsculas demais para que as veja. Todos os diferentes materiais são combinações desses *tijolos básicos* do universo, e eles se combinam dessa maneira por causa das *interações* entre as partículas. Não fosse por essas interações, não haveria nenhum elemento ou estrutura em todo o Universo. Haveria apenas um caos informe de partículas isoladas, cada uma condenada para sempre à solidão total e sem nenhuma percepção de suas companheiras, mesmo que estivesse no meio de uma profusão delas.

Aqui a Bruxa da Massa fez uma pausa para tomar fôlego, com visível orgulho do papel-chave que desempenhava no Cosmo. Pousou no chão e chegou mais perto de Dorothy. Duas pedras grandes que por acaso se encontravam em seu caminho moveram-se obsequiosamente para lhe dar passagem.

— Não sou a única Bruxa aqui. Como mencionei, há quatro interações e portanto há quatro bruxas para representá-las. De todas as minhas colegas interações eu sou ao mesmo tempo a mais e a menos importante. Sou a mais importante porque a extensão da minha influência vai além de toda imaginação. É através de mim que a Terra e todos os planetas são guiados em sua dança anual em torno do Sol. Mais ainda, eu convenço enormes tapetes de astros a se aglomerarem no seio de galáxias rodopiantes e faço até grupos de galáxias se enfeixarem em formidáveis aglomerados. Embora eu me preocupe principalmente com os grandes padrões do Cosmo, produzo efeito também numa escala mais local. Nenhum pardal cai sem que a gravidade esteja lá. Sou assim, a mais importante das interações porque minha influência penetra todo o Universo, mas sou também a mais insignificante porque o efeito que produzo é fraco. Muito fraco, ela acrescentou, bastante pesarosa. — Comparado com as interações que minhas irmãs tornam possíveis, o efeito que uma partícula tem sobre outra através da gravidade é apenas microscópico. Na verdade a palavra *microscópico* não faz justiça à disparidade.

A figura corpulenta da Bruxa pousou gradualmente no chão e olhou à sua volta, de uma maneira que pareceu a Dorothy bastante apreensiva.

— Uma de minhas irmãs interações é a Bruxa da Carga, a personificação da interação eletromagnética. Os efeitos dela são observados mais claramente nos processos elétricos e em campos magnéticos, mas ela também trabalha nos bastidores em tudo que você vê à sua volta. Chamam-na EM.

— Oh! Dorothy a interrompeu muito entusiasmada. — Sabe que tenho uma tia Em?

— Não parece que haja qualquer conexão entre EM e sua tia, criança! disse a Bruxa, inclinando seu possante busto para examinar Dorothy através de um minúsculo par de óculos. — EM representa uma das quatro grandes interações que controlam o mundo. Seu alcance é tão grande quanto o meu, e sua força é maior numa medida que você não pode nem de longe imaginar. Se considerar duas partículas que têm ambas massa e carga elétrica, a força entre elas devida à gravidade é *muito* menor que aquela devida às cargas elétricas que possuem. E não estou falando de um milhão de vezes mais fraca, ou um milhão de milhões, ou um milhão de milhão de milhões...

Aqui G indicou um raio de sol que incidia obliquamente através dos galhos de uma árvore acima das suas cabeças. Em sua luminosidade cintilava uma miríade de minúsculos grãos de poeira. — Minha força comparada à da EM é menor do que o tamanho do menor dos grãos de poeira que você pode ver cintilando naquele raio de sol comparado com a distância em que os telescópios mais possantes podem ver estrelas nas profundezas distantes do Universo. — A

Bruxa apontou vagamente para o brilhante céu azul lá no alto. Dorothy não viu nenhum sinal de estrela, mas estava disposta a acreditar que estavam lá. — Na verdade, menor, continuou a Bruxa enfaticamente, do que aquele ínfimo grão de poeira se comparado com toda a distância em que a luz teria possivelmente se propagado desde que o Universo começou.[2]

— Isso parece mesmo muito pequenininho, Dorothy concordou, mas se a gravidade é assim tão fraca, como se explica que a gravidade, e não esta outra interação enormemente poderosa, guie os planetas?

— Cooperação, minha cara! respondeu a Bruxa da Massa com um sorriso satisfeito, falando confidencialmente ao pé do ouvido de Dorothy. A menina pensou que aquilo era mais ou menos como ter um *tête-à-tête* com uma montanha. — Trabalho de equipe é a resposta. Quando partículas sentem a atração da gravidade, trabalham juntas para o mesmo objetivo. Cada uma delas atrai todas as demais, sem exceção. O efeito da gravidade tal como experimentado por quaisquer duas partículas isoladamente pode ser infinitesimal, mas quando todas as partículas no Universo estão atraindo todas as demais, em grande escala isso supera toda competição. Há uma *imensidão* de partículas no Universo!

A Bruxa se aprumou de novo, ainda parecendo enormemente satisfeita consigo mesma. (Parecia a Dorothy que *enormemente* era a palavra exata.)

— A força de EM é inconcebivelmente maior do que a minha, ela continuou, mas apesar disso no seu mundo você tem menos consciência da atração elétrica do que da gravidade. Isso acontece porque EM está sempre em guerra consigo mesma. Ela é a Bruxa da Carga, e a carga elétrica se manifesta sob dois tipos: positiva e negativa. Ela opera de tal maneira que cargas opostas (uma positiva e uma negativa) atraem uma à outra, mas duas cargas semelhantes (duas positivas ou duas negativas) se *repelem*. Elas se empurram mutuamente, ao passo que minha gravidade nunca rejeitaria partícula *alguma*. O universo contém cargas tanto positivas quanto negativas, e os dois tipos estão presentes em igual número. A atração que as cargas de tipo oposto sentem uma pela outra é contrabalançada pela repulsa entre cargas do mesmo tipo. O equilíbrio é tão

2. É verdade! De fato essa comparação não faz justiça à discrepância. A comparação depende das partículas que escolhemos, mas para dois prótons a força da gravidade fica abaixo da do eletromagnetismo por um fator de 10^{36}. Se supusermos que as menores partículas de poeira que somos capazes de ver têm um milésimo de milímetro de lado a lado, o que é quase certamente pequeno demais, a multiplicação pelo fator acima dá uma distância de mais de cem milhões de megaanos-luz (um megaano-luz é um milhão de anos-luz). Isso é uma grande distância, mais de mil vezes maior do que aquela em que a luz poderia se propagar ao longo de toda a existência do Universo.

preciso que as imensas forças da interação elétrica de EM ficam inteiramente ocultas, continuou a Bruxa, de maneira um tanto presunçosa.

— Em alguns casos os efeitos não se equilibram inteiramente, mas em geral o equilíbrio é exato, ou tão perto disso quanto você consiga imaginar.[3] Assim, como vê, embora ela seja muito mais forte do que eu, sua força é em geral perdida numa luta consigo mesma, e minha abordagem cooperativa acaba dominando. Sua luta interna é tão apuradamente equilibrada que o efeito global de suas imensas forças elétricas não é sentido, e minha gravidade reina suprema. Isto é, domina em grande escala, especificou a Bruxa. — Talvez você tenha notado que o efeito que a gravidade tem sobre alguma coisa torna-se menor, quanto menor essa coisa é. Uma mosca consegue caminhar parede acima contra a atração da gravidade sem nenhuma dificuldade, ao passo que um elefante teria muito pouco sucesso. Um animal realmente grande, como uma baleia, não consegue suportar nem seu próprio peso com conforto a menos que seja sustentado pela água. Quanto menor é, menos o objeto é afetado pela gravidade porque há um número menor de partículas dentro dele para cooperar com a interação. Para os átomos que estão *dentro* de um material, o efeito relativo da gravidade é igualmente muito menor.

Com essas palavras a Bruxa ascendeu e seguiu flutuando (se é que se pode descrever assim o movimento de alguém que está simplesmente rejeitando qualquer efeito da gravidade) até o vagão do metrô. Talvez como uma concessão ao senso de adequação de Dorothy, pousou novamente no chão e ficou postada ao lado do bloco espalhafatoso com sua solidez pardacenta. Fez um leve aceno, e a massa de metal se agitou como o fizera antes e soergueu-se ligeiramente no ar. Mais um gesto e o vagão se elevou ainda mais, acelerando cada vez mais depressa até que chegou tão longe acima que parecia um trenzinho de brinquedo, a girar lentamente no céu azul.

Dorothy teve então a impressão de que ele talvez tivesse ficado um pouquinho menos minúsculo. Depois ficou óbvio que começara a crescer e ela teve certeza de que o vagão estava caindo, despencando do céu na sua direção. O chão se sacudiu quando ele desabou a pouca distância do lugar onde ela estava. Ouviu-se um estrépito de metal amassado e uma enorme nuvem de poeira se ergueu para obscurecer o vagão. Quando a poeira começou a baixar, Dorothy pôde ver que o vagão de metrô, nunca um objeto de notável beleza, era agora um destroço estilhaçado.

3. É difícil compreender com que grau de precisão as cargas positivas e negativas se equilibram umas às outras no mundo. Apesar da força inerentemente vasta do eletromagnetismo, na prática seus efeitos são tão reduzidos que a gravidade domina por completo em grande escala.

— Por aí você vê o efeito que a gravidade pode ter. As conseqüências de uma queda séria podem parecer devastadoras, mas se você olhar com mais atenção, vai ver que esse objeto não mudou tanto assim. Está torcido e distorcido em muitos lugares, sem dúvida, mas continua basicamente reconhecível. As rodas continuam sendo rodas, embora já não estejam bem encaixadas em seus eixos. O assentos continuam sendo assentos, embora desgarrados de suas cavilhas. — Apontou os fragmentos contorcidos que se espalhavam em volta. — E, o que é mais significativo, embora a forma e a constituição de suas partes possam ter mudado a ponto de deixá-lo irreconhecível, a natureza essencial dos *materiais* de que elas são feitas não mudou. Os painéis de metal podem estar torcidos, mas continuam sendo de metal. As janelas de vidro podem ter se estilhaçado, mas continuam sendo de vidro. A disposição das partículas no interior dos materiais — os átomos que compõem o metal ou o vidro — não foi alterada. É nessa escala, a escala do átomo, que EM reina suprema.

A Bruxa fez uma pausa dramática para enfatizar seu argumento e depois continuou. — Quando você examina a matéria em maior detalhe, considerando sua estrutura interna e até a natureza dos átomos que a compõem, o equilíbrio das forças de EM torna-se menos exato. Como as cargas elétricas positivas e negativas não estão *inteiramente* no mesmo lugar, há um leve desequilíbrio nas forças elétricas que elas produzem, e mesmo essa pequena força residual é relativamente tão enorme que, ao lado dela, a gravidade pode parecer insignificante. O átomo — qualquer átomo — é uma criação unicamente de efeitos elétricos.

— Não sei muito sobre a pequena escala, continuou a Bruxa. (Dorothy não achou difícil acreditar nisso. A Bruxa certamente não dava a impressão de saber muito sobre qualquer coisa *pequena.*) — Átomos e partículas e toda essa espécie de coisas não são realmente o que me interessa. Não me dou ao trabalho de tentar distinguir um do outro. Como todos têm alguma massa e energia, todos sentem o efeito da gravidade, por mais fracamente que seja, mas suas naturezas particulares não me interessam. Se você explorar tamanhos ainda menores, vai descobrir outras partículas, de todo tipo, ao que dizem. Então poderá encontrar minhas outras duas irmãs bruxas, que talvez lhe pareçam ter pouca influência em qualquer escala mais ampla.

— Primeiro há a Bruxa da Cor, o espírito da chamada interação forte. A maioria das pessoas a considera um bocadinho difícil. Ela pega um pouco pesado, você poderia dizer. Seu nome completo, Cromodinâmica Quântica, é bastante pomposo e geralmente ela é conhecida pelas iniciais QCD.[4] Segundo, há a

4. De *Quantum Chromo Dynamics.* [N.T.]

Bruxa Fraca, personificação da interação fraca. É preciso ficar de olhos abertos, porque ela é sorrateira. Penetra furtivamente nas partículas e as *modifica.* Nenhuma dessas duas últimas tem efeitos muito óbvios numa escala maior, a escala do mundo que você habita.

— Por falar daquele mundo, Dorothy disse cautelosamente, por acaso sabe como eu poderia voltar para ele?

— Receio não ser a pessoa que pode lhe dizer isso. Contemplo as coisas de um ponto de vista amplo. Como lhe disse, o mundo da matéria — o mundo dos átomos e partículas em geral — realmente não é da minha conta.

— Então preciso saber sobre partículas para voltar para casa? Pode me dizer alguma coisa sobre elas? Dorothy perguntou, ansiosa.

— Não estava me ouvindo? retrucou a Bruxa. — Não, não posso! Elas são todas uma coisa só para mim. Se quer algum detalhe, deveria ir visitar o Mágico dos Quarks. Partículas são o assunto dele. Se quer ir para casa, deveria visitar o Mágico e pedir que a aconselhe.

— Onde posso encontrá-lo? perguntou Dorothy.

— Ora, no seu palácio na Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras), respondeu a Bruxa. — Tenho certeza de que ele pode lhe dizer tudo que quer saber, e provavelmente muito mais.

As quatro interações básicas

Considera-se em geral que há quatro interações (ou forças) básicas que atuam sobre as partículas ou entre elas. Podemos vê-las, em certo sentido, como aspectos diferentes de uma interação *unificada* e elas podem tornar-se indistinguíveis a energias suficientemente elevadas (veja o capítulo 13). Para fins práticos, no entanto, elas são quatro interações distintas.



1. **Gravidade:** Trata-se de uma interação entre todas as partículas que têm massa. Isso significa todas as partículas dotadas de energia, porque energia e massa são a mesma coisa (capítulo 6). É uma força de grande alcance, que decresce em intensidade com o quadrado da distância entre as partículas envolvidas. A energias normais, a força da gravidade entre duas partículas é extremamente fraca e não pode ser detectada na prática.



2. **Eletromagnetismo:** Trata-se de uma interação entre partículas dotadas de carga elétrica. Como a gravidade, é uma força de grande alcance, mas entre duas partículas, como prótons, é fenomenalmente mais forte. Há dois sinais de carga, positivo e ne-

gativo. Cargas com sinais opostos se atraem; as de mesmo sinal se repelem mutuamente. Isso resulta num equilíbrio tão exato de forças elétricas que a força da gravidade, embora muito mais fraca, domina em grande escala.

3. **A interação forte (de cor):** Trata-se de uma interação entre partículas dotadas de "carga cor". As únicas partículas com essa característica que conhecemos são os quarks. Léptons como o elétron não sentem a interação de cor em absoluto. Isso se assemelha ao modo como partículas eletricamente não carregadas não experimentam forças elétricas. A interação forte resulta numa ligação muito estreita e firme em pequena escala e é capaz de resistir à repulsa elétrica que existe entre prótons quando eles estão muito comprimidos no interior de um núcleo atômico. Ela só é eficaz ao longo de uma pequena extensão (veja o capítulo 9).



4. **A interação fraca:** Esta tem um alcance menor e é muito mais fraca do que a interação forte. Apesar disso, foi observada porque faz coisas que as outras interações não podem fazer. Por exemplo, é capaz de converter um nêutron num próton, um elétron e um antineutrino. Uma partícula se transforma em três partículas diferentes, como se vê no decaimento nuclear β (veja o capítulo 13).



. . . .

— Mas como posso chegar à Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras)? insistiu Dorothy em tom de choro. Teve dificuldade em pronunciar o parêntese, mas achou que tinha se saído bastante bem.

— Não é óbvio? A paciência da Bruxa estava se esgotando. — Eu já lhe disse que, enquanto as interações fornecem toda a coerência do Universo, as partículas fornecem os tijolos de que ele é feito. Para encontrar o Mágico dos Quarks você tem de seguir a *Estrada dos Tijolos.*

A Bruxa da Massa apontou para uma brecha entre as árvores, e Dorothy pôde ver além dela, dispostas no chão, quatro lajes de pedra em que estavam entalhadas as palavras

TERRA

AR FOGO

ÁGUA

Do meio dessas lajes uma estrada calçada saía em espiral e se perdia na distância. Em cada laje estava gravado um nome ou símbolo. Sobretudo a letra **e**,



mas algumas traziam os símbolos **p** ou **n**. Tanto ♉︎ quanto Ω se espalhavam nessa estrada, mas apareciam bem mais adiante.

Ao lado da estrada, Dorothy viu pedras fincadas no solo, como marcos, todas entalhadas na forma de uma letra **h** com uma barra cruzando a haste, $\hbar$. As que estavam mais perto dela pareciam muito pequenas, mas ficavam maiores à medida que o caminho avançava. — Que será isto? perguntou a si mesma em voz alta.

De maneira bastante surpreendente, a Bruxa pareceu compreender perfeitamente o que ela estava pensando. — Essas são indicações da Constante de Planck, a constante universal que marca a escala do comportamento quântico. As constantes universais, ela continuou antes que Dorothy tivesse tempo de perguntar, são quantidades que têm um valor definido único e absoluto, invariável através do espaço-tempo. São os pontos fixos num universo bastante variável.

. . . .

Constante de Planck, $\hbar$

A constante de Planck está no próprio cerne da física quântica. Faz parte de um grupo muito seleto de *constantes fundamentais* que inclui também a unidade básica de carga

elétrica e e a velocidade limite c (freqüentemente chamada de velocidade da luz). Esse seleto grupo de valores parece ser básico para a própria estrutura e natureza do Universo que habitamos.

A constante de Planck fixa a escala em que os efeitos quânticos são dominantes. Em geral não os percebemos porque vivemos numa escala tão grosseira que $\hbar$ é minúscula demais para ser notada.

O tamanho de $\hbar$ dá a *granularidade* do mundo, a escala em que o mundo se separa numa miríade de pequenos blocos como os átomos. O valor de $\hbar$ determina o tamanho dos átomos e dos pacotes discretos de luz chamados fótons. Planck foi o introdutor da noção de que a luz se apresenta em pequenos pacotes, ou *quanta*, usando um argumento bastante sutil sobre a emissão de radiação pelos objetos quentes. Einstein tornou a idéia muito mais aguçada em sua teoria do *efeito fotoelétrico*, a emissão de elétrons quando a luz incide numa superfície de metal.

. . . .

— Mas, Dorothy protestou, se é tão imutável quanto está dizendo, como podem os marcos que estou vendo ficar cada vez maiores à medida que o caminho avança? Isso não me parece muito constante.

— Às vezes as aparências enganam, respondeu a Bruxa. — É fácil nos enganarmos quanto aos tamanhos relativos de objetos distantes. Você tem a impressão de que o tamanho dos marcos aumenta, mas talvez seja a estrada que está se tornando constantemente menor. Esse caminho vai fazê-la descer a uma escala em que efeitos quânticos se tornarão importantes. Na verdade, serão dominantes.

— Mas que são efeitos quânticos? perguntou Dorothy, desesperada.

— Isso você mesma pode descobrir à medida que avança ao longo do caminho. Então, pé na estrada!

Com essas lacônicas palavras de despedida, a Bruxa deu as costas a Dorothy. Esta lhe agradeceu polidamente por sua instrução, mas aquela gigantesca personalidade parecia ter perdido o interesse. Dorothy, não vendo razão para mais demora, pôs-se a andar resolutamente ao longo do caminho pavimentado.

Enquanto caminhava, examinava os marcos à beira da estrada que haviam discutido pouco antes. Os primeiros por que passou eram minúsculos — mal podiam ser vistos acima do capim. De fato, ocorreu a ela, era bem possível que mais para trás na estrada houvesse muitos deles, minúsculos demais para que os pudesse perceber. À medida que seguia seu caminho, firme em sua intenção de descobrir alguma coisa sobre essas partículas que pareciam ser tão básicas para tudo que conhecia, os marcos iam se tornando regularmente maiores, até que atingiram a altura de um sinal normal de estrada, ou mais.

Enquanto marchava em frente, ela teve a impressão de ouvir vozes, vindas de toda parte ao seu redor, que diziam em tons diferentes:

Siga a Estrada dos Tijolos,

Siga a Estrada dos Tijolos,

Siga a Estrada dos Tijolos,

Siga, siga, siga, siga,

Siga a Estrada dos Tijolos....

2

O Espantalho Observador

Seguindo seu caminho, Dorothy notou que as pedras entalhadas por que passava à beira da estrada continuavam a crescer até finalmente chegar à altura da sua cintura. A seqüência terminou abruptamente quando as pedras atingiram esse tamanho considerável e Dorothy, continuando sua jornada, logo deixou as últimas pedras para trás.

Após caminhar por um breve tempo, ela se viu passando por uma campina à sua esquerda e parou para admirar a vista. Aquela lhe pareceu extremamente diferente das muitas campinas que conhecera no passado. Qualquer pessoa da parte do mundo de onde vinha era um especialista em campos e pradarias em geral, mas essa campina era diferente. Não é que ela fosse coberta por uma bruma dourada e luminosa, o que acontecia é que *ela própria* era nebulosa. Avançando mais um pouco, pôde ver figuras que se moviam de um lado para outro e de vez em quando penetravam na bruma. Na maior parte das vezes, pareciam sair de mãos vazias, mas de vez em quando uma ou outra arrastava *alguma coisa* de dentro do nevoeiro geral. Dorothy olhou aquilo com mais atenção para tentar descobrir o que estava acontecendo.

— Estão recolhendo elétrons, disse uma voz logo acima da sua cabeça.

Dorothy olhou em volta, surpresa, mas não conseguiu ver nada além de um poste firmemente fincado no campo atrás de si. Dando uma olhadela para cima, no entanto, viu um espantalho pendurado no alto do poste e contemplando a campina com grandes olhos pintados no saquinho recheado que lhe fazia as vezes de cabeça. Usava um chapéu pontudo e botas pesadas balançavam abaixo das pernas de suas calças. Os dois braços pendiam desajeitadamente dos lados do corpo, terminando num par de velhas luvas de trabalho, e tufos desmazelados de palha escapavam das mangas de sua camisa e das suas calças. Enquanto Dorothy o fitava cheia de espanto, ele de repente lhe fez um aceno amistoso com a cabeça.

— Você falou agora há pouco? perguntou a menina, admirada.

— Com certeza, respondeu o Espantalho. — Como vai você?



— Vou bem, obrigada, Dorothy respondeu. — Poderia por favor repetir o que estava dizendo sobre elétrons?

— Sem dúvida. Mas poderia primeiro me ajudar a descer daqui? Depois de passar toda a minha vida de trabalho neste campo, acho que tenho direito de deixar meu, hum, posto por um tempinho. — Aqui ele deu uma risadinha da própria piada.

Dorothy o baixou cuidadosamente. Como ele era mais alto do que ela, temeu que a tarefa pudesse ser um tanto complicada, mas, sendo feito só de pano recheado, ele era muito leve. Ajeitou-o no chão delicadamente de modo a tê-lo de pé diante de si, apesar de uma ligeira tendência de suas pernas a se dobrarem sob ele. Os braços continuavam a pender desajeitadamente dos lados. (Ao conhecê-lo melhor, iria descobrir que os braços e as pernas do Espantalho tendiam a balançar livremente, a menos que ele os estivesse usando deliberadamente para algum fim.)

— Certo! continuou o Espantalho enquanto oscilava vagamente para lá e para cá. — Você estava perguntando sobre os elétrons. Como talvez já tenha percebido, o que você provavelmente pensava ser uma campina é na realidade uma nuvem ou um ajuntamento de muitos elétrons. Isso é geralmente chamado de uma amplitude. Você está vendo uma amplitude de muitos elétrons com toda a clareza de que é capaz. Neste momento, alguns dos elétrons estão sendo recolhidos para uso em outro lugar.

— Não, certamente não percebi isso! retrucou Dorothy. — Não sei nada sobre essas coisas e não consigo entender como você pode saber. O espantalho da fazenda do meu tio não parece saber muito sobre coisa alguma, se não se importa que eu diga isto.

— Bem, você pode ter dúvidas, respondeu o homem recheado de palha. — É verdade, como você estava sugerindo, que não tenho miolos, mas estou sempre de olho aberto. Não posso fazer outra coisa, não é? Eles foram pintados bem arregalados. — Outra risadinha. — Seja como for, vejo muita coisa. Observo tudo que acontece nas minhas vizinhanças. Assim, embora possa não conter nenhum cérebro, minha cabeça está absolutamente recheada de *informação* — de observações que fiz.

— Oh, entendo, disse a menina, embora não se sentisse totalmente convencida. — Bem, tenho a impressão de que não compreendi coisa alguma do que você disse agora mesmo. Que quer dizer por amplitude?

— Ora, amplitude é a essência de qualquer partícula ou outro objeto físico simples. A amplitude diz tanto sobre um objeto quanto é possível saber sobre ele. Ela *é* o objeto, até onde você é capaz de percebê-lo. Assim, tudo que você sabe sobre partículas como os elétrons é sua amplitude.

— Então por que tudo parece tão nebuloso? perguntou Dorothy, um tanto confusa. — Pensava que as partículas eram coisas pequenas, duras, bem definidas, como bolas de gude reduzidas a pontinhos minúsculos.

— Acho que a melhor resposta que posso dar para isso, respondeu o Espantalho, é *não*! Em pequena escala, as partículas realmente não são de maneira alguma assim. As coisas podem parecer bem definidas e precisas para você em seu mundo cotidiano de grande escala, mas uma vez que você desce ao nível da Constante de Planck, as coisas têm um aspecto muito diferente. Venha ver por si mesma. — Assim dizendo, o Espantalho marchou em direção a uma saliência próxima na névoa indistinta que cobria a área. *Marchou* é provavelmente a melhor descrição para a maneira como se moveu, embora fosse diferente de qualquer marcha que Dorothy já tivesse visto. Levantava um pé no ar de cada vez e o balançava para frente, enquanto o resto do seu corpo pendia desajeitado e inerte. Fosse qual fosse a palavra correta para descrevê-lo, aquilo funcionava. Logo eles estavam postados junto a uma grande elevação que se erguia da cobertura nebulosa geral.

— A campina foi plantada de modo desigual, e a densidade da nuvem de elétrons é muito irregular. A *distribuição de probabilidade* para a amplitude do elétron varia de um lugar para outro.

— O que é distribuição de probabilidade? perguntou Dorothy.

Seu amigo recheado de palha respondeu como ela temia que fizesse. — É uma distribuição de probabilidade, a probabilidade que você tem de encontrar um elétron numa dada posição.

— Mas o que faz a probabilidade nessa história? Certamente as coisas na ciência são definidas e previsíveis. Em geral, tudo deve estar definitivamente num lugar e estar rumando definitivamente em direção a outro.

— Você pode pensar assim, respondeu o Espantalho. — Pode acreditar que a natureza é completamente determinista e previsível *em princípio*. Mas, mesmo que fosse assim, não há nenhuma maneira concebível de alguém jamais *realmente* prever o movimento de cada átomo minúsculo num vasto aglomerado de átomos que estão todos colidindo entre si e ricocheteando. Você não pode observar de imediato um único átomo com suficiente precisão, que dirá os vastos números encontrados na prática. Tudo que você pode fazer é falar de uma distribuição de probabilidade para os átomos. Pode estimar a probabilidade de que átomos se movam em dada direção e de que certo número o faça de maneira rápida ou lenta. Não pode dizer nada sobre átomos individuais.

O Espantalho fez uma pausa para que Dorothy pudesse considerar o paradoxo de que as coisas podiam ser previsíveis em princípio, mas ainda assim não podiam de maneira alguma ser previstas.

Probabilidade

Probabilidade não é uma característica recente apenas da física quântica. Mesmo na física clássica, você só pode descrever o movimento dos átomos em termos de distribuições de probabilidade. Por exemplo, você jamais pode calcular o movimento de todos os átomos num gás. Pode falar apenas da distribuição provável de suas velocidades e direções de movimento.

O notável na física quântica não é o uso de distribuições de probabilidade em si mesmo, mas o modo como elas derivam de *amplitudes* que têm fases (ver abaixo).

— Aqui, num estado quântico, toda amplitude tem uma distribuição de probabilidade que a acompanha. — E antes que Dorothy pudesse fazer mais uma pergunta, ele continuou rapidamente. — A amplitude dá a melhor descrição que você pode ter do que realmente *é*, mas isso está muito longe de ser o mesmo que você encontraria se realmente *olhasse*. Uma das primeiras coisas que você precisa saber é que *simplesmente olhar* é uma coisa que não existe. Deixe que eu lhe diga que, a esta altura, tenho bastante experiência de observar, e sei que, seja qual for a maneira como você possa fazer uma observação, irá certamente interagir com a coisa observada e *mudá-la*. Não há nenhum meio que lhe permita observar algo sem alguma interação física. Se você olha para uma coisa, isso significa que um fóton de luz ricocheteou dela. Interações como essa vão em geral mudar aquilo que você está olhando.

Mesmerizado por seu próprio discurso, o Espantalho continuou. — Uma distribuição de probabilidade lhe diz a probabilidade de encontrar uma condição ou outra quando você realmente olha. Informa-lhe, de fato, as quantidades relativas do que *há* para ser descoberto. Sempre que você olhar, vai observar uma ou outra das opções possíveis, e quando faz uma observação como essa, ocorre que a amplitude realmente muda. Muda para uma amplitude que permite apenas *um* resultado possível, aquele que você acaba de ver. Não há mais nenhuma incerteza nesse estágio, porque você *viu* o que viu. À medida que o tempo passa,

no entanto, você em geral acaba descobrindo que, porque já não está mais olhando para o sistema ou interagindo com ele, a amplitude vai crescer de maneira constante para incluir também outras possibilidades.

— De todo modo, ele arrematou abruptamente, há um máximo local na amplitude neste lugar, de modo que você tem maior probabilidade de encontrar um elétron aqui. Basta você enfiar o braço, sentir o que há à sua volta e ver o que consegue encontrar.

Obedientemente, Dorothy esticou o braço, enfiando-o no nevoeiro brilhante que a cercava. Quando o fez, ficou surpresa e horrorizada ao ver sua própria mão ficar correspondentemente enevoada assim que penetrou na bruma. Ali, estendendo-se a partir da manga do seu vestido, estava seu próprio braço tal como sempre o conhecera, mas do cotovelo para baixo ele se espalhava e tornava borrado e indistinto.

— Que aconteceu? exclamou, assustada. — Que foi feito da minha mão? — Puxou-a depressa e ficou aliviada ao ver que voltara a ter a aparência de sempre.

— Ora, ela entrou no nevoeiro da realidade e, em conseqüência, tornou-se mais real.

— Mais real! Dorothy repetiu. — Para mim não pareceu nada mais real. Foi como um sonho ou um pesadelo. Agora é que ela parece perfeitamente real e de volta ao normal.

— Ah, mas isso não passa de uma *ilusão de normalidade*. Na escala do ser que você habita agora, uma escala em que a Constante de Planck não pode mais ser ignorada, uma bruma como essa *é* a realidade. Sua idéia de normalidade, com tudo bem definido e preciso, *é* uma ilusão. Uma ilusão que decorre do fato de você ser incapaz de ver os detalhes de seu próprio mundo com suficiente precisão.

— Aqui tudo é *quantizado*, afirmou enfaticamente o Espantalho. — Estamos agora numa escala em que lidamos com os átomos em si mesmos, com as partes básicas simples que no seu mundo são minúsculas demais para que você as perceba. Algo tão complexo quanto seu corpo normal contém números inimagináveis de átomos e não teria possibilidade de existir nesta escala. No entanto, para sua própria paz de espírito,[1] você experimenta a ilusão de que você e as

1. Isso evita também que eu tenha de fazer desenhos em que *tudo* é simples, fora de foco e quantizado.

pessoas que encontra são muito parecidas com o que seriam num mundo em grande escala. Esta ilusão persiste enquanto você não faz um contato estreito demais com a realidade à sua volta.

O Espantalho fez uma pausa para deixar suas palavras calarem fundo. — O mundo perde sua precisão e nitidez na escala da Constante de Planck. É como uma fotografia de jornal, que parece clara até que você a olhe bem de perto, quando então descobre que é feita de muitos pontinhos, e a figura nítida se torna embaçada.

— Só um minuto, interrompeu Dorothy. — Você disse que tinha passado a sua vida aqui neste campo, então como pode saber alguma coisa sobre fotografias de jornal?

— Oh, já observei muitas delas, lamentou o Espantalho. — A quantidade de lixo que as pessoas largam na zona rural é desalentadora. — Deu um suspiro melancólico.

— Aqui, no entanto, ele recomeçou, os pontos que formam o grande quadro são os elementos básicos de que o mundo é composto. Isso é igualmente verdadeiro no mundo de que você vem, mas como estão numa escala dada pela Constante de Planck, $\hbar$, os "pontos" são pequenos demais para que você os perceba em sua existência comum. Se olhar com proximidade suficiente para o tecido da matéria, haverá um embaçamento de posição e movimento, de ser e vir a ser, que não pode ser distinguido com um nível maior de precisão. Se essa indefinição que você vê nesta escala parece absurda, isso ocorre em parte por causa de suas idéias preconcebidas acerca do que posição no espaço deveria ser. Um elétron, por exemplo, é um objeto definido com seu próprio caráter bastante específico. O que ocorre é que suas características não incluem uma posição singular, única, no espaço.

— Por que seria assim? perguntou Dorothy, que estava vagamente ofendida com a idéia de que as coisas não eram como sempre tinham parecido ser. — Isso não parece direito. Por que o mundo tem essa imprecisão ou granularidade intrínseca que você descreve?

— Como eu haveria de saber?, seu companheiro respondeu, fitando-a de olhos arregalados (embora esse, é claro, fosse o único modo como *podia* olhar). — Por que pergunta isso a mim? Não passo de um espantalho. Só posso lhe dizer o que observo, e isso é o que as coisas são.

Ligeiramente embaraçada, Dorothy desviou os olhos para a bruma de elétrons circundante e notou que havia uma espécie de cintilação correndo sobre ela, lembrando bastante o efeito que ela vira por vezes numa imagem de televisão mal ajustada ou num filme antigo. Quando comentou isso, seu companheiro assentiu, pensativo, com sua cabeça de palha.

— Isso é um sinal de como a *fase* da amplitude está variando o tempo todo.

— E o que é a fase? perguntou Dorothy com alguma trepidação.

— Acho que a melhor maneira de responder a isso é seguir adiante pela estrada para ver os *Dançarinos das Interferências.* Acredito que eles estão prestes a executar uma de suas apreciadas Danças das Interferências, e não é muito longe. — Pôs-se a caminhar animadamente ao longo da Estrada dos Tijolos, jogando uma perna adiante da outra com desenvoltura enquanto Dorothy saltitava ao seu lado. Logo chegaram a um grupo de casas que cercava em parte um quadrilátero aberto. Nessa praça, um grupo de figuras resplandecentes estava formando filas. Assim que Dorothy chegou, uma delas deixou o grupo e veio na sua direção.

A recém-chegada parecia ser uma mulher vestida com extravagância, com saias esvoaçantes. Muitas echarpes e faixas pendiam de seu traje. Pelo menos essa era a aparência que tinha, mas era bastante difícil dizer ao certo. No conjunto, pareceu uma figura realmente estranha aos olhos de Dorothy. Seu cabelo e todas as suas echarpes flutuavam em torno de seu corpo em todas as direções, desvanecendo-se tenuemente nas proximidades das bordas. Ao olhar para um lado dessa figura singular, onde sua forma se tornava cada vez mais nebulosa, Dorothy notou que parecia ainda estar olhando diretamente para a aparição, embora ela agora parecesse muito mais indistinta e menos substancial. No todo, a figura era tão notável que a menina se viu encarando-a mais atentamente do que seria delicado. Estava espantada com sua inspeção quando a recém-chegada se dirigiu a ela.

— Certo, queridinha, sou uma *amplitude*, um membro do famoso grupo dos "Dançarinos das Interferências". Talvez tenha ouvido falar de nós e de nossas espetaculares distribuições de probabilidade. — Deixou-se cair numa reverência graciosa com (provavelmente) um arzinho presumido, e continuou:

— Como sem dúvida você está começando a aprender, as coisas aqui não estão entediantemente restritas a ficar num só lugar definido e não em qualquer outro. Espalhamo-nos por toda parte, como você poderia dizer. Somos distribuídas. A amplitude para qualquer coisa tem uma distribuição de probabilidade associada a si. Isso dá a probabilidade de se *encontrar* realmente essa coisa numa ou noutra posição. Estamos *mais provavelmente* em alguns lugares do que em outros, mas você *poderia* nos encontrar onde menos espera. Bem, talvez não onde *menos* espera, pois haveria uma probabilidade desprezível de que estivéssemos espalhadas *demais*, mas a verdade é que gostamos de ser um pouquinho imprevisíveis.

. . . .

Amplitudes e fases

Na física clássica, as probabilidades se combinam diretamente e o acréscimo de mais opções sempre *aumenta* a probabilidade.

Na física quântica, uma amplitude fornece a descrição mais básica, e ela tem uma *fase*. As amplitudes podem se combinar para somar *ou* subtrair, com o resultado de que a inclusão de uma outra amplitude pode aumentar *ou* diminuir o tamanho da amplitude total e da probabilidade resultante.

As probabilidades são dadas unicamente pelo tamanho da amplitude (na realidade, pelo quadrado da amplitude) e não dependem da fase geral.

. . . .

— Se vocês se espalhassem tanto, certamente iriam se chocar uns com os outros. Isso não interfere na sua dança, quando estão todos tentando trabalhar como um grupo? perguntou Dorothy, pois esta foi, por alguma razão, a primeira consideração que lhe veio à mente.

— Claro que interfere! É exatamente isso que está em jogo na dança das interferências. São os padrões de interferência que a torna tão espetacular. Procuramos fazer o uso mais dramático possível de nossas fases, sabe.

— Era sobre isso que eu devia ter perguntado! lembrou-se Dorothy. — O que você quer dizer com suas fases? O que é uma fase?

— Bem, isso é um pouquinho difícil de explicar. Vou tentar lhe mostrar. Assim dizendo ela enfiou a mão nas volumosas dobras e camadas de seu traje e tirou um objeto grande e redondo que, à primeira vista, pareceu a Dorothy ser um pandeiro. Olhando mais de perto, porém, ela viu que não havia nenhum daqueles guizos em volta dele. Em vez disso, tinha em seu centro uma grande agulha ou seta, lembrando muito uma bússola ou um ponteiro de relógio. Essa seta girava continuamente, apontando ora para cima, ora para baixo, ora para um lado ou para outro.

— Esta é a minha fase, a amplitude lhe informou. — Num certo sentido é uma direção, mas não aponta para nenhuma direção particular do espaço. É um sinal de nossa orientação uns em relação aos outros. Você poderia concebê-la como algo semelhante à roda de cor que os pintores usam para indicar cores complementares.[2]

Dorothy pôde ver que a face do objeto estava agora marcada com um círculo de cores, cada uma diante de outra que lhe era complementar, ou oposta. De um lado as cores se mesclavam através do vermelho, do verde e do azul. Do outro lado do círculo, em oposição a estas, estavam suas cores complementares: ciano, magenta e amarelo. O ponteiro continuou a circular pela face, passando

2. Observe, por favor, que isto é uma descrição das cores comuns, usada como uma analogia ilustrativa. As cores comuns *não* são as cores que os quarks possuem. Apesar do nome, estas últimas "cores" nada têm em comum com a cor como a conhecemos, e pouco têm a ver com fase.

incessantemente de uma cor para a seguinte. Enquanto Dorothy olhava, as áreas vermelha e ciano se destacaram da orla e foram levadas para o centro do círculo. Ali elas se sobrepuseram e se combinaram para dar uma região branca. Isso coincidiu tão bem com seus contornos que ambas as cores desapareceram de vista.

— Minha fase não é constante. Muda continuamente, o tempo todo. Nós, as amplitudes, somos todas um bocadinho corrente alternada/corrente direta, ou AC/DC. Nossa fase atual determina como nos combinamos com outras amplitudes.

— É mesmo? Como pode fazer isso? Dorothy perguntou com interesse.

— Quando duas amplitudes se encontram, suas fases relativas decidem como elas devem se combinar. Se ambas têm a mesma fase, elas se somam. Passam a ser então duas vezes o que teriam sido separadamente e quatro vezes mais intensas. A probabilidade que está associada a uma amplitude qualquer é dada elevando seu *tamanho* ao quadrado, o que quer dizer multiplicando-o por si mesmo. A probabilidade não depende em absoluto da fase total, embora, como disse, fases individuais determinem o modo como as amplitudes se somam. No caso em que as amplitudes se somam *em fase*, a probabilidade da combinação das duas tornou-se *quatro vezes* maior do que para uma única amplitude. Encontrar uma outra amplitude de fase semelhante lhe dá um impulso e tanto, posso lhe garantir. Ambas nos sentimos duas vezes mais altas, ela exclamou, orgulhosa. — Você precisa experimentar isso para compreender. Não importa quais são as nossas fases — para cima, para baixo ou para o lado —, contanto que sejamos ambas a mesma.

Aqui ela refletiu por um momento e seu tom ficou mais contido. — No outro extremo, posso encontrar uma amplitude com fase oposta, uma que complemente a minha, ou se oponha a ela, exatamente. Essa é uma experiência muito desalentadora porque nós nos cancelamos uma à outra. Nossa soma pode ser muito menor do que as partes, porque o que somos subtraí do que a outra é, e nada resta. É um daqueles relacionamentos em que não conseguimos viver juntas, e assim nos destruímos uma à outra, pelo menos enquanto permanecemos juntas. Depois que nos separamos, retornamos ao que éramos antes, talvez mais tristes e mais sábias — quem pode dizer? Este último caso, em que duas amplitudes podem se cancelar uma à outra completamente, é conhecido como interferência destrutiva.

. . . .

Fase e interferência

Classicamente, se há mais maneiras pelas quais alguma coisa pode ocorrer, torna-se *mais* provável que ela ocorra.

Na física quântica, quando duas amplitudes de igual tamanho se combinam, elas podem, num extremo, se combinar *em fase* para dar duas vezes a amplitude – *quatro* vezes a probabilidade para apenas uma amplitude. Isso é *interferência construtiva.*

No outro extremo, duas amplitudes que se combinam *fora de fase* se subtraem para dar probabilidade *zero.* Isso é *interferência destrutiva.*

A inclusão de mais amplitudes *pode* reduzir o total geral em alguns pontos.

Em geral, as fases relativas de duas amplitudes vão variar de um lugar para outro e isso tende a produzir tanto regiões de probabilidade aumentada quanto regiões de probabilidade reduzida – as típicas bandas claras e escuras dos padrões de interferência ópticos.

A probabilidade na região inteira se contrabalança, situando-se num valor que é apenas a soma das probabilidades para cada amplitude isoladamente, mas a distribuição pode ser muito diferente.

. . . .

— Isso tudo soa muito estranho para mim, admitiu Dorothy. — Devo confessar que ainda não entendo o que vem a ser essa fase e por que ela teria de ter um efeito como esse em seus encontros.

— Quanto a por que ela nos afeta desse modo, bem, quem pode dizer por que o mundo é como é? Mesmo assim, o fato é que, quando duas amplitudes se combinam, o relacionamento de suas fases determina se elas vão se cancelar mutuamente, aumentar uma à outra, ou simplesmente passar uma pela outra com pouco efeito aparente. Não é muito diferente do que você pode observar com pequenas ondas ou encrespamentos na superfície de um lago. À medida que uma ondulação se desloca, a água se eleva e se abaixa formando sucessivos picos e depressões que assinalam a fase variável da onda que passa. Digamos que uma ondulação como essa passe pelos dois lados de um poste que se erga sobre a superfície do lago. Então, no lugar onde as partes da ondulação se reunirem de novo, elas poderão se combinar *em fase*, produzindo uma perturbação maior na água, ou poderão estar *fora de fase* e se cancelar mutuamente. No segundo caso, a água nesse ponto fica parada, não se eleva nem se abaixa de maneira alguma.

— Seja como for, estamos prestes a iniciar nossa Dança das Interferências, ela concluiu. — Venha ver o quanto seu efeito depende da interferência.

Ela correu de volta para sua trupe de dançarinos, e eles formaram duas filas através da clareira. Como todos os dançarinos estavam vestidos de maneira exótica, com roupas esvoaçantes que se desvaneciam na insubstancialidade, Dorothy supôs que fossem todos alguma espécie de amplitude. Alguns usavam trajes que pareciam vagamente medievais. Alguns exibiam cabeças como as dos cavalinhos de pau. Outros usavam elaborados adereços arquitetônicos, como al-

tas torres barrocas. Alguns usavam roupas de suntuosidade régia, com coroas nas cabeças. Em todos os casos, as figuras eram muito espalhadas e desapareciam de vista em suas extremidades.

De repente, cada fila começou a dançar em direção à outra. Dorothy não podia ouvir nenhuma música, e talvez tivesse perguntado a si mesma como conseguiam manter o ritmo, se não estivesse óbvio que não o mantinham. Cada um parecia estar dançando num ritmo próprio e as fases de todos os dançarinos oscilavam por toda parte em tempos diferentes.

As filas de dançarinos passaram uma através da outra. Isto não significa, como você esperaria normalmente, que os dançarinos de uma fila passaram por entre os de outra. Não, neste caso os dançarinos realmente *passaram uns através dos outros.*

À medida que passavam, cada amplitude era *sobreposta* à que se contrapunha a ela. Vez por outra as duas tinham a mesma fase, e quando isso acontecia a fila se avolumava com uma intensidade várias vezes maior que seu valor original. Em outros pontos as fases estavam em oposição, e então os dançarinos desapareciam por completo. Dorothy ficou horrorizada com isso, mas depois, para seu alívio, viu que, quando as filas passavam uma pela outra e se separavam, os dançarinos eram restaurados, inteiros como antes. Muitas e muitas vezes as figuras se encontravam e se dissolviam, embora sempre reaparecessem assim que se separavam. Quando Dorothy observou o encontro de uma figura com cabeça de cavalo e uma torre grotesca e alta, e viu que elas se destruíam uma à outra, pensou num jogo de xadrez, embora este fosse um jogo esquisito em que *ambas* as peças eram tomadas e em seguida devolvidas sãs e salvas ao tabuleiro.

As filas de dançarinos ondulavam para frente e para trás, dividindo-se e girando de tal modo que passavam uma pela outra vezes sem conta. Em cada passagem Dorothy as via se elevarem a grandes alturas em alguns pontos e submergir por completo em outros, de modo que a praça se encheu de padrões complexos e sempre cambiantes de picos e depressões que se erguiam e afundavam enquanto dançavam juntos.

Quando terminaram, as amplitudes se alinharam todas e fizeram reverências (provavelmente). Dorothy aplaudiu com entusiasmo. Tinha sido uma visão maravilhosa e finalmente ela teve a impressão de ter entendido *alguma coisa* sobre o efeito que a fase podia ter sobre amplitudes quando uma interferia na outra.

A trupe de dançarinos deixou a praça e esta, à primeira vista, pareceu deserta. Dorothy percebeu então que, num canto, havia uma espécie de barraquinha de feira. Perguntou a um espectador interessado, que estivera assistindo à dança, o que era aquilo e o que vendia, se é que vendia alguma coisa.



— Ora, é o mercado municipal! Como esta é a praça do mercado, naturalmente o mercado é aqui.

— Mas um mercado não costuma ter uma porção de barracas, vendendo toda sorte de coisas? Dorothy perguntou, perplexa.

— De fato costuma, e é isso que acontece aqui. Há um grande número de barracas, vendendo praticamente tudo que você poderia desejar.

— Mas só estou vendo uma! protestou Dorothy.

— Ah não! Você está vendo realmente todas elas, mas como estão todas no mesmo lugar, você vê uma *superposição* delas. Esta é de fato a Feira Estadual da localidade, de modo que há toda uma superposição de estados. É uma situação muito comum por estas bandas. Há barracas aqui para tudo que se possa imaginar. Não poderia ser de outra maneira porque, afinal de contas, *haverá* sempre uma amplitude presente para tudo que é possível. Você pode ver isso a partir dos regulamentos no quadro de avisos da municipalidade, apontou o prestativo cidadão.

Dorothy não o tinha observado antes, mas agora que ele lhe fora apontado, viu um quadro de madeira sustentado por estacas e com vários artigos espalhados sobre sua superfície.

O que não é proibido é compulsório.	Opções não são opcionais.
Você *tem* de guardar seu bolo e comê-lo.	Tudo que pode acontecer vai acontecer.
Não negue nada a si mesmo.	**Você *pode* ter tudo.**

— Talvez haja um bocadinho de exagero em alguns desses pontos, observou o Espantalho, que viera se postar ao lado de Dorothy. "Tudo que pode acontecer vai acontecer" significa que deve haver uma *amplitude* presente para tudo que pode acontecer. Como as amplitudes têm suas probabilidades associadas, há alguma *probabilidade* de que tudo que pode acontecer venha a fazê-lo. Expresso desta forma, é claro, torna-se um truísmo.

. . . .

Superposição

O princípio da superposição declara que para tudo que *pode* acontecer, haverá uma amplitude presente.

Isso é um pouquinho parecido com a afirmação clássica de que haverá uma probabilidade presente para tudo que *pode* acontecer. O notável acerca das amplitudes quânticas é que as várias possibilidades podem *interferir* uma com a outra e se afetar mutuamente.

. . . .

— Pode ser, replicou o passante prestativo, mas no que diz respeito às amplitudes, continua sendo verdade que haverá uma presente para qualquer situação possível, por mais improvável que ela seja. Pode ser uma amplitude muito pequena, mas estará lá. Na realidade, essas amplitudes vão estar todas presentes, e as diferentes possibilidades podem interferir umas com as outras.

— Se tudo que for possível é compulsório, Dorothy interveio, tentando uma outra abordagem, por que não há barracas de feira na área toda? Isso seria igualmente admissível, não? E muito mais sensato, acrescentou.

— Oh, mas não é admissível de jeito nenhum! exclamou o cidadão bem informado. — Você parece não ter prestado atenção ao quadro de avisos. Não viu o que aparece embaixo, em letra miúda?

Dorothy olhou de novo, e realmente havia uma observação que ela havia ignorado, impressa em tipos particularmente pequenos.

POSTURA MUNICIPAL
Todas as barracas de feira devem ser localizadas *somente* na posição designada.

Como para enfatizar esse ponto, ouviu-se um estrépito quando um outro feirante se aproximou conduzindo uma carroça. Vendo todo o espaço vazio, ele parou a certa distância do resto e começou a converter sua carroça em barraca. Mal havia manobrado para colocá-la em posição, no entanto, uma pequena coluna de soldados surgiu correndo dentre as casas. Cercaram o feirante recém-chegado e rapidamente o convenceram a observar as restrições vigentes. Apesar de seus protestos indignados, ele foi energicamente arrastado para seu local próprio, onde imediatamente se mesclou com todos os outros feirantes.

Despedindo-se do passante comunicativo, Dorothy e o Espantalho avançaram pelo espaço vazio até a barraca de feira aparentemente solitária instalada a dois terços do caminho, só que, como Dorothy lembrou a si mesma, apesar das aparências, tratava-se ao que tudo indicava não de uma barraca apenas, mas de um mercado inteiro.

Assim que chegaram um feirante os abordou.

— Olá, senhor e senhorita. Que gostariam de comprar hoje? Há muitas pechinchas, pois os negócios não estão muito animados neste momento. — Este, pelo menos, parecia ser um comentário procedente; ela própria e seu companheiro eram as duas únicas pessoas que a menina conseguia ver por ali.

— Acho que gostaria de algo para comer, se vocês têm alguma coisa do gênero, ela respondeu, cautelosa.

— Ah, certamente. Que tal umas deliciosas costeletas de porco ou um belo bife? O proprietário da barraca tornara-se mais nítido e Dorothy viu que tinha uma cara vermelha impassível e usava um avental listrado e um chapéu de palha. Atrás dele, pôde ver que havia cortes de carne de todo tipo pendurados na barraca. Obviamente, era um Açougueiro.

— Não, muito obrigada, disse Dorothy. — Não sinto vontade de comer carne neste momento, e não teria como cozinhá-la. Há mais alguma coisa que eu poderia comer?

— Com certeza, minha cara. Que tal um apetitoso pãozinho de gergelim, ou talvez um pão de passas? — Curiosamente, o feirante mudara em resposta à sua indagação. Agora era gordo, com uma cara redonda e lívida. Usava um grande avental branco e um chapéu branco mole, e atrás dele havia pilhas de toda sorte de pães e bolos. Agora era um Padeiro.

— É pena, mas eles parecem um pouquinho pesados. Eu preferiria alguma coisa... *light*.



Mais uma vez a barraca mudou. Agora o comerciante era alto e magro, com um avental grosseiro de lona todo engordurado. Atrás dele a barraca estava repleta de velas em castiçais de todo tipo.

— Não, não, Dorothy disse ao Fabricante de Velas. — Quando disse *light*, não estava pensando em luz. Estava pensando em coisa muito diferente.

Às palavras *muito diferente* a barraca diante deles se transformou num louco troca-troca entre várias possibilidades. Apareceu uma barraca que vendia verduras e flores, a cargo de uma mulher envergando um vestido apropriadamente florido. Logo foi substituída por uma que vendia vestidos, comandada por uma senhora alta e magra, com uma roupa que parecia positivamente desenxabida em contraste com as outras. Em seguida surgiu uma barraca que exibia livros, cujo proprietário, baixote e careca, estava tão absorvido na leitura de um de seus próprios volumes que não tomou nenhum conhecimento de Dorothy.

Essas barracas apareceram em rápida sucessão, e todas eram bastante nítidas e claras durante o breve período em que ficaram em evidência. Sua aparição foi intercalada com a de outras barracas muito mais tênues, que representavam comerciantes menos prováveis. Surgiu um Ferreiro, com uma fornalha incandescente atrás de si. Apareceu também um homem de cara fechada que espiou Dorothy por trás de um cubículo de vidro blindado; ela não ficou sabendo ao certo o que ele fazia. Muito apagado e obviamente muito improvável, ela teve a efêmera visão de um homem vestido num chamativo terno xadrez. Tinha uma expressão de sinceridade transparente e estava diante de um cartaz que dizia:

Bob, o Honesto
Loucuras de Verão!
Ofertas imbatíveis!
Levamos *prejuízo* a cada
automóvel vendido!

— Parem, parem! exclamou Dorothy. — Não quero nada disso. Acho que gostaria de um bombom.

Mal dissera essas palavras e o turbilhão de opções se estabilizou numa única barraca, em que se exibia toda espécie de deliciosas guloseimas: pirulitos, pastilhas de menta, caramelos, chocolates e os mais variados bombons. Essa barraca pertencia a um homem grande, com jeito de tio e uma expressão bastante matreira. Dorothy não tinha certeza se simpatizava muito com ele, mas achou suas mercadorias bastante atraentes.

— Poderia me vender alguns daqueles caramelos? perguntou, apontando o conteúdo de um pote de vidro perto da primeira fila da exposição e oferecendo um dólar como pagamento.

— Certamente, minha cara! Lamento dizer, no entanto, que não posso lhe dar nenhum troco. Fiz a tolice de instalar minha caixa registradora na mesma posição que a de um outro comerciante e, lamentavelmente, elas tinham fases opostas, de modo que interferiram destrutivamente uma com a outra e minha caixa registradora desapareceu. Vai reaparecer quando a feira se dispersar e as amplitudes se separarem, mas por enquanto não posso dar troco. Gostaria de uma dessas barrinhas de menta, quem sabe? Algumas delas interferiram construtivamente com as velas do Fabricante de Velas e por isso ficaram enormes.

— Não, obrigada, Dorothy respondeu num tom polido, mas firme. — Não consigo nem imaginar que gosto poderiam ter. Pensando bem, não tenho tanta certeza de que quero algum doce. Tenha um bom dia, acrescentou delicadamente, enquanto se retirava do mercado o mais depressa que podia sem parecer demasiado grosseira.

Exatamente nesse instante notou que a Estrada dos Tijolos continuava a partir do lado mais distante da praça, e o Espantalho ficou muito satisfeito de acompanhá-la quando começou a caminhar por ela.

— Bem, isso *foi* estranho, comentou Dorothy à medida que se afastavam. — Sei que me explicaram como estados podem se superpor uns aos outros, mas estive em feiras estaduais lá no Kansas e todas as barracas são completamente separadas.

— Não se poderia esperar outra coisa lá do Kansas, respondeu o Espantalho. Lá, todas as barracas e comerciantes são objetos grandes, complexos, que contêm um imenso número de átomos, e quaisquer efeitos de interferência se

compensaram a tal ponto que você não vê nenhum sinal deles. No Kansas, você pode ver interferência de elétrons e fótons, mas não de objetos muitos maiores; de estados, mas não de feirantes. Aqui, num ambiente alegórico, é diferente. Qualquer coisa ou pessoa que você encontra pode exibir comportamento quântico para enfatizar uma idéia.

Enquanto caminhavam juntos pela estrada, Dorothy tentava sem sucesso imaginar como devia ser existir exclusivamente para ilustrar alguma questão teórica.

3 O Sabichão de Lata

Dorothy e o Espantalho foram andando pela estrada que pouco depois entrou numa mata. A visibilidade entre as árvores era boa, e um pouco mais adiante Dorothy pôde ver um reflexo de sol em um metal brilhante. Isso a intrigou, pois lhe pareceu deslocado num ambiente tão natural e, conduzindo seu companheiro, desviou-se da estrada até o ponto que havia chamado sua atenção.

Lá ela encontrou, sentada inerte num tronco caído, uma figura assombrosa que parecia ter sido inteiramente construída de folha de estanho brilhante. Tinha membros finos, lustrosos, com juntas articuladas, cabeça cilíndrica com uma ponta cônica e um corpo que lembrava uma lata. Os únicos traços no seu rosto, se é que esta palavra pode ser aplicada à parte frontal de um cilindro destituído de qualquer outra característica, eram duas grandes lentes que, pelo menos naquele momento, pareciam opacas e sem vida. Na frente de seu peito havia uma tela, muito parecida com a de uma televisão pequena, em que Dorothy viu a seguinte mensagem cifrada:

>insira disco de sistema no *drive* A

— Que será que isto quer dizer? Dorothy perguntou a si mesma em voz alta. — Que poderá ser um disco de sistema?

Como era o único indivíduo presente em condição de responder, o Espantalho sugeriu: — Talvez seja isso que está no chão perto dele. — Não havia dúvida de que estava alguma coisa ali jogada, perto da mão imóvel da criatura. Não pareceu a Dorothy nenhuma espécie de disco, porque era quadrado, mas era o único candidato visível. — Onde será que isto deve ser enfiado? perguntou.

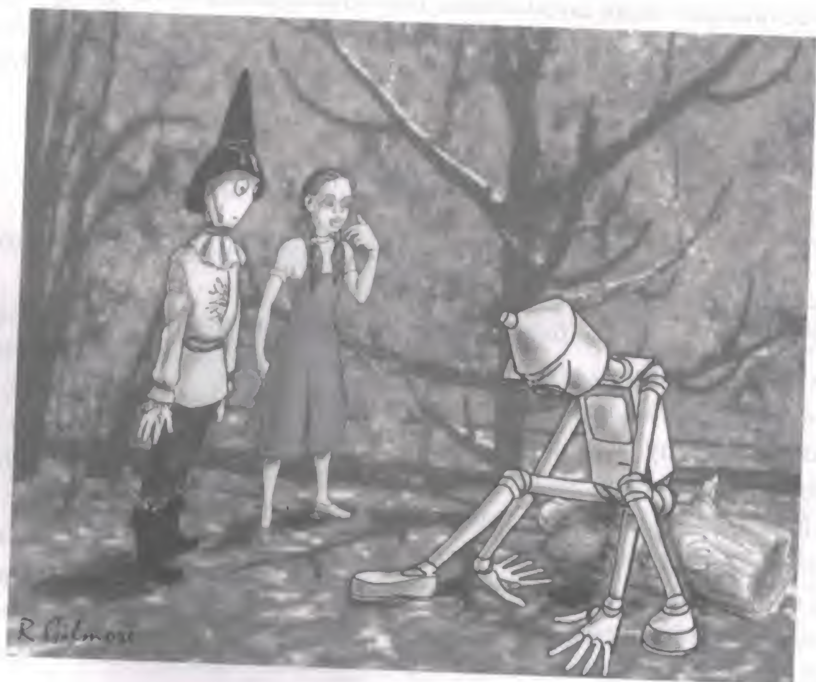
Novamente, era na verdade uma pergunta retórica, mas o Espantalho, sempre observador, respondeu-lhe. — Há uma espécie de fenda embaixo da tela. Veja se ele se encaixa nela. — Dorothy assim fez e, após uma ou duas tentativas, conseguiu fazê-lo entrar. Assim que o disco foi empurrado com firmeza para seu lugar, ouviu-se um zumbido e uma seqüência de mensagens nada esclarecedoras

irrompeu na tela. Um brilho fosco surgiu detrás dos olhos da figura, que começou a mover os braços e por fim se pôs de pé, meio bamba.

— Muito obrigado. Muito obrigado, disse. Falava em frases curtas e sem ênfase, e sua voz soava monótona e mecânica. — Poderia ter ficado ali sentado para sempre. Mas você apareceu e recarregou meu sistema. Certamente salvou a minha vida. Ou melhor, restaurou-a.

— Não há de quê, disse Dorothy, sua própria voz tremendo um pouquinho pois não sabia bem o que dizer ou, na verdade, o que tinha feito. — Como veio a ficar nessa situação?

— É uma história bastante triste. Eu era um entusiasta dos computadores. Ainda sou, num sentido muito significativo. Não havia nada de que gostasse mais do que de trabalhar com meu computador. Sempre que um *hardware* novo era lançado eu era o primeiro a instalá-lo. — Seus olhos brilhavam de entusiasmo enquanto ele falava. Dorothy ouvira muitas vezes essa expressão ser usada, mas nunca tão literalmente! A luz opaca por trás de suas lentes havia se intensificado e agora seus olhos brilhavam fortemente. — Com o passar do tempo, um número cada vez maior de atualizações foi lançado. Eu gastava cada vez mais tempo substituindo componentes. Sem realmente considerar se precisavam ser substituídos, eu receio. Não considerava nem o que eles eram nem o que faziam. Foi então que fiz minha terrível descoberta. Mas era tarde demais.



— Que descoberta foi essa? perguntou Dorothy, tentando soar adequadamente solícita e não meramente curiosa.

— Descobri que, no meu entusiasmo, havia atualizado a mim mesmo. Agora sou essencialmente um computador. Um computador moderníssimo, mas ainda assim um computador. Estava sentado aqui quando houve uma tempestade, com raios e trovoadas. A oscilação da corrente provocada pelos raios apagou todos os meus programas. De modo que cá estava eu, ou melhor, não estava, até que você me recarregou. Obrigado de novo. — A voz monocórdia, reverberante, parou bruscamente.

— Não foi nada, Dorothy respondeu. — Tenho certeza de que faria o mesmo por mim, ela se ouviu dizendo antes de perceber que ridículo era aquilo. — Por quanto tempo esteve aqui?, perguntou para disfarçar seu embaraço.

— Estive aqui durante três meses, duas semanas, cinco horas, seis minutos e 47 segundos, pelo que diz meu relógio interno. Só que, como você pode entender, não estive aqui. Tinha parado de funcionar. Não tenho nenhuma memória. — Mas passado um momento ele pareceu reconsiderar. — Na verdade, tenho uma memória. É não-volátil e muito expressiva, se posso dizer assim. Suponho que deve estar muito desatualizada a esta altura. — Aqui Dorothy teve a impressão de detectar uma ponta de tristeza, embora isso não aparecesse na voz. — Sei quanto tempo faz que fui desligado, mas não sei nada do que aconteceu durante esse tempo.

— Por que não vem conosco? propôs a bondosa menina. — Estamos indo ao encontro do Mágico dos Quarks, e tenho certeza de que ele pode lhe dizer tudo que precisa saber. Pelo que sei, ele é muito sábio e bem informado.

O Sabichão de Lata concordou entusiasticamente (embora, novamente, não se pudesse perceber isso pela sua voz), e partiram todos pela Estrada dos Tijolos.

O caminho, que nunca fora totalmente reto, começou nesse momento a fazer meandros de um lado para outro e também para cima e para baixo. Quando estavam subindo a duras penas um morro bastante íngreme no topo do qual a estrada fazia uma curva fechada, ouviu-se um súbito tropel de cascos e um ruído de rodas na superfície acidentada, e uma carroça em disparada surgiu sacolejando e bamboleando lá em cima. A carroça deu uma guinada furiosa quando o cocheiro viu a curva repentina — mas era tarde demais! A carroça saiu da estrada num arranco e foi se chocar de lado contra uma árvore robusta. O cavalo, após uma pausa para sacudir a cabeça e soltar um sonoro relincho de desagrado, desvencilhou-se de seus tirantes e saiu galopando pela mata, seguido freneticamente por seu ex-condutor.

Dorothy e seus companheiros não conseguiram prestar muita atenção ao destino posterior seja do cavalo seja do condutor, porque a carroça havia se despedaçado ao trombar com a árvore e seu variado conteúdo estava despencando morro abaixo em direção ao ponto em que eles estavam.

Observaram com certa apreensão objetos escuros enquanto desciam e passavam por eles rolando e quicando. Pelo que Dorothy podia ver, fosse o que fosse que integrava a carga do cocheiro imprudente, ele transportava também um grande número de volumosos blocos de carvão. Ela os examinou enquanto passavam aos trambolhões e pensou que devia ser uma quantidade realmente *muito* grande, pois o fluxo das peças em rápido movimento continuou por um tempo extraordinariamente longo. Muitos dos blocos tinham parado na estrada vizinha, e de vez em quando um recém-chegado vinha colidir com um estacionário. Ela notou com um interesse momentâneo que o que acontecia depois de cada um desses impactos dependia dos tamanhos relativos dos pedaços envolvidos.

Em certo momento uma grande massa se chocou com uma pequena, e as duas continuaram rolando, a menor movendo-se agora mais rapidamente do que a maior. De outras vezes, uma massa pequena batia contra um alvo grande. A maior era arremessada à frente lentamente, enquanto a menor recém-chegada ricocheteava para trás. Ocasionalmente duas massas de tamanho igual colidiam e isso resultava numa troca total de papéis, a que permanecia imóvel saltando à frente na velocidade com que tinha sido atingida, enquanto a outra parava por completo no lugar em que estava.

— Aí você vê a conservação do momento, observou o Sabichão de Lata falando logo atrás do ouvido de Dorothy enquanto ela observava as várias colisões. — Algum dia você já fez a pergunta: "Qual é a verdadeira medida do movimento?"

— Não posso dizer que tenha feito, mas é óbvio, não é? Dorothy respondeu. — É o próprio movimento, a taxa em que alguma coisa se move. É o que podemos chamar de velocidade, suponho.

— Não, na realidade não é isso. Momento é algo mais significativo. Momento é a velocidade multiplicada pela massa da coisa envolvida. Se olhar com atenção, você verá. De vez em quando um objeto vai ricochetear para trás após bater numa árvore. Pode então colidir de frente com outro que está chegando. O dois partilham seu movimento. O modo como o fazem depende das suas massas, bem como de suas velocidades.

Dorothy olhou como lhe fora sugerido e viu que, realmente, havia casos em que um item colidia com uma árvore e ricocheteava, entrando na trajetória de outro. Quando dois objetos de tamanho comparável se encontravam, ambos se moviam na direção do que vinha mais depressa. Num outro caso, em que uma

massa pesada bateu contra uma massa menor que se movia apenas um pouco mais depressa, ambas se deslocaram, após a colisão, na direção em que a grande seguia, mas mais lentamente. Em um caso uma massa menor e mais veloz colidiu com outra ligeiramente maior e mais lenta, e ambas entraram em repouso completo.

— Como você vê, o momento é conservado. O produto da massa pela velocidade é preservado após uma colisão.

— Como sabe que é preservado? Dorothy protestou. — Naquele último caso que vi, havia movimento antes, mas depois não havia nenhum. Os dois blocos tinham parado. Como é possível que alguma medida de movimento tenha permanecido a mesma num caso como esse?

— O momento é uma quantidade vetorial. Tem uma direção e também uma magnitude. Quando dois momentos com direções opostas são somados, eles tendem a se cancelar. Se forem iguais e opostos, cancelam-se exatamente. O momento total será zero. Isso vigora por mais depressa que cada componente esteja se deslocando. O momento total é o mesmo que se verifica quando ambos estão em repouso.

— Mas, protestou Dorothy, certa de que havia algo de errado ali, alguma coisa tem de ser diferente. Não posso acreditar que duas coisas que se deslocam muito rapidamente possam ter exatamente o mesmo movimento que tinham quando em repouso. Isso não faz sentido. Não pode ser verdade.

— E não é mesmo. O momento total é o mesmo. Mas o momento não é a única medida de movimento. A energia cinética total vai mudar. A energia cinética não tem direção. É sempre positiva e se soma. As duas massas tinham energia cinética antes de colidirem. Depois da colisão, não tinham nenhuma.

— Então a energia não é conservada quando as coisas colidem. É isso? — Dorothy estava fazendo um grande esforço para entender aquilo direito.

— Não, não é isso. Certamente não. A energia é conservada. Mas a energia cinética, não. A energia pode se converter de uma forma em outra. A energia cinética é a de um objeto em movimento. Há outras formas de energia.

Nesse instante houve uma súbita explosão na carroça despedaçada. Alguma coisa, presumivelmente aquilo que estivera queimando todo aquele carvão, escolhera aquela hora para explodir. Ouviu-se um zunido, e um grande caldeirão de ferro saiu voando pelo ar. Caiu com grande estrondo no meio da estrada, perto do lugar em que estavam. O Sabichão de Lata andou até ele e, com visível esforço apesar de sua força metálica, ergueu-o. Havia uma grande depressão no ponto da superfície da estrada em que o caldeirão batera.

— Foi por pouco, o Sabichão de Lata comentou. — Foi também uma ilustração da conversão da energia. A explosão liberou energia química na poeira de

carvão. Esta se converteu em energia cinética, aquela que um objeto em movimento possui simplesmente por estar em movimento. Essa energia arremessou o caldeirão no ar. À medida que foi subindo, ele ficou mais lento. A energia cinética que tinha foi convertida em energia potencial gravitacional. Depois, ao cair, ele ganhou velocidade novamente. A energia potencial se converteu de novo em energia cinética. Por ocasião do impacto, parte da energia foi convertida em ondas sonoras. O resto foi usado na distorção da estrada. A energia total foi a mesma durante todo esse tempo.

— Mas a panela fez um estrago e tanto na estrada, disse Dorothy, pensativa. — É uma pena.

— Não, isso é bastante normal. A maioria das estradas tem alguns estragos feitos por panelas aqui e acolá.

— Sem dúvida é bastante normal, concordou o Espantalho, que passara todo aquele tempo observando. — Tudo foi normal. Normal demais, num certo sentido. Você esteve envolvida novamente pela "ilusão da normalidade", e viu objetos em movimento como os veria se tivesse voltado para casa, no seu mundo em grande escala.

Dorothy estava achando essa discussão tão interessante que, pela primeira vez, a menção de casa não a deixou triste. — Como as coisas ficam diferentes aqui quando se movem? Sem dúvida movimento é movimento, seja qual for a escala das coisas.

— Talvez movimento seja movimento, como você diz, mas na escala em que as amplitudes e os efeitos quânticos são óbvios, tudo isso *parece* certamente diferente. Olhe de novo para os objetos que estão passando e agora veja suas amplitudes.

Dorothy olhou para a torrente de massas que descia aos trambolhões (elas pareciam estar saindo da carroça destroçada há um tempo absurdamente grande!). Agora, ao invés de percebê-las como individuais e distintas, via cada uma como um borrão comprido que se estendia estrada abaixo. Ao longo do comprimento de cada uma havia um padrão variável que reconheceu como semelhante à variação de fase que vira antes junto às saltitantes amplitudes na Dança das Interferências. Viu bandas de fases variáveis que se estendiam por todo o comprimento de cada amplitude. Em algumas as bandas eram muito espaçadas; em outras estavam muito mais próximas entre si.

— Cada uma tem um momento diferente. Isso significa que tem um comprimento de onda diferente. O comprimento de onda é a distância entre os picos, que são os pontos mais altos alcançados pela fase em seu ciclo. O comprimento de onda é maior em algumas do que em outras por causa de diferenças nos momentos delas. As mais rápidas têm comprimentos de onda menores. Os picos na fase estão mais próximos uns dos outros, explicou o Sabichão de Lata, numa fala um tanto longa para ele.

— Isso não parece certo, respondeu Dorothy, tentando visualizar. — Certamente, quanto mais rápido o movimento, *mais* os picos deveriam estar separados. Não deveriam estar mais espalhados, se estão se movendo mais depressa?

— Eles estão espalhados. A separação aumentou com a velocidade das partículas, e as suas amplitudes estão mais espalhadas, mas esse não é o efeito dominante. À medida que as partículas se movem mais rapidamente, suas energias aumentam, e isso significa que a freqüência da amplitude aumentou também. A freqüência é o número de vezes que a fase gira por segundo. Isso aumenta proporcionalmente à energia, e a energia cinética aumenta mais depressa do que a velocidade do objeto. A energia cinética aumenta na razão direta do quadrado da velocidade — isto é, da velocidade multiplicada por si mesma. Se a velocidade duplicasse, a energia cinética aumentaria por um fator de quatro. Esta é uma mudança ainda maior, e o aumento na freqüência domina. Assim, como você vê, a fase muda mais rapidamente e as bandas de fase ficam de fato mais próximas do que antes.

— Então essa fase sobre a qual está me falando muda o tempo todo? Dorothy perguntou, só para conferir se tinha entendido bem.

— Está correto. E assim o comprimento de onda diminui quando o momento aumenta. O comprimento de onda é a distância, ao longo de uma onda, entre picos sucessivos em sua fase. Ao mesmo tempo, a freqüência aumenta com a energia, como acabei de dizer. A fase faz um giro completo mais vezes por segundo. Como vê, as amplitudes não ficam simplesmente paradas.

. . . .

Relações de De Broglie e Einstein

Essas relações são fatos básicos notáveis da física quântica. As observações confirmam que são verdadeiras, embora nada nos teria permitido prever que o seriam.

Elas relacionam as propriedades ondulatórias das amplitudes das partículas, como comprimento de onda e freqüência, com as chamadas propriedades cinemáticas das partículas, como momento e energia.

Relação de De Broglie: o comprimento de onda, λ, é inversamente proporcional ao momento, ρ.

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\rho}$$

A equação de Einstein: a freqüência, ν, é proporcional à energia cinética, E

$$v = \frac{E}{2\pi\hbar}$$

Por que isto é assim? Quem sabe?

. . . .

Dorothy olhou na direção que o Sabichão de Lata estava apontando, para um dos blocos de carvão que tinha entrado em repouso e estava jogado na beira da estrada. Não ficou surpresa demais ao ver que ele era indistinto e ia se tornando cada vez mais impreciso na direção das suas bordas. Isso ela já esperava. O que não esperava era que o objeto parecia agitar-se com fases em alteração. Enquanto olhava, ele foi se espalhando gradualmente cada vez mais, tornando-se mais extenso e difuso a cada momento.

— Que está acontecendo?, ela perguntou. Sem dúvida você me disse que as amplitudes são sempre difusas e espalhadas, como aquela parece ser, mas por que ela muda tanto?

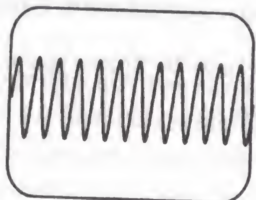
— Porque não se trata de uma única onda com um comprimento definido. É um pacote de ondas de momentos diferentes. Nenhum objeto pode estar em repouso completo. Algumas das ondas no pacote têm de ter momento. Isso significa que elas se moverão e que todas o farão de maneiras diferentes. Por isso, a amplitude está sempre mudando.

— Mas por quê? protestou Dorothy, sentindo que cada pergunta que fazia era respondida com uma nova afirmação completamente indecifrável. — Por que uma amplitude deveria ter todo esse movimento e não ficar em completo repouso? Isso me parece um tanto ilógico.

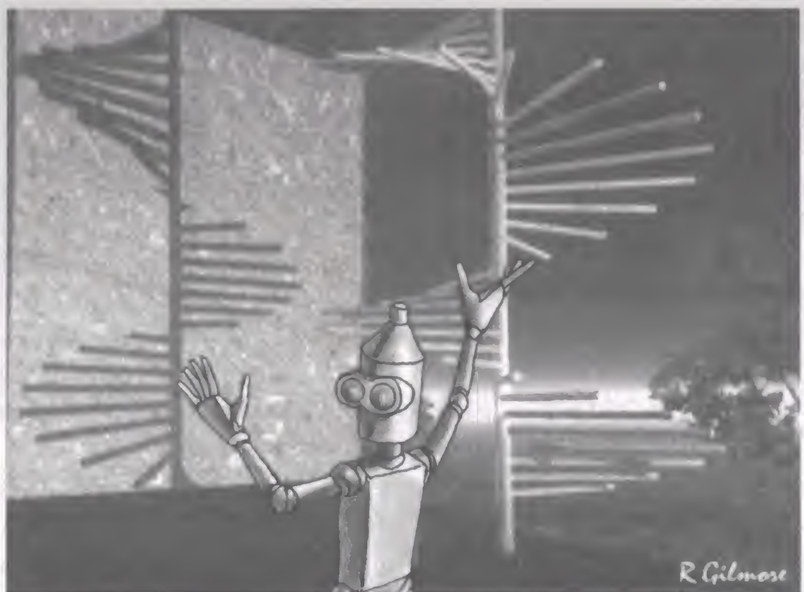
— Seja como for, interrompeu o Espantalho, isso é uma conseqüência do que já lhe foi dito. Tenho certeza de que o Sabichão de Lata está ansioso para lhe explicar.

Pelo que Dorothy podia ver, ele não parecia particularmente ansioso. Mas afinal, ela se lembrou, deve ser muito difícil parecer ansioso quando se tem um cilindro de lata desprovido de feições em vez de um rosto.

— Uma partícula que tem um momento definido tem um comprimento de onda definido, o Sabichão de Lata começou. Dorothy não conseguia entender por que isso era particularmente relevante, mas pelo menos era alguma coisa que já tinha ouvido. Esperou para ouvir o que mais seu tutor de lata tinha a dizer.



— Sua amplitude é uma onda sem características, como esta. — Enquanto ele falava, a



tela no seu peito se iluminou para mostrar uma linha ondulada que a percorria de lado a lado. — Isto indica como a fase varia ao longo de uma amplitude. Mas esta não é, de fato, uma indicação muito boa. A fase na realidade gira, dando voltas e voltas; não vai simplesmente para cima e para baixo.

— Você se lembra do que a amplitude lhe disse antes da Dança das Interferências? cochichou o Espantalho. — As fases sempre dão voltas e voltas desse jeito.

— A variação de fase é mais bem ilustrada por aquela árvore das fases cíclicas ali, continuou o Sabichão de Lata com determinação mecânica. Deu alguns passos, saindo da estrada, e mostrou uma planta bastante esquisita diante de uma parede de pedra lisa. A árvore, se é que aquilo era uma árvore, tinha um tronco central reto e galhos nus que se projetavam em ângulos de 90 graus. Eram esses galhos que pareciam tão esquisitos. Todos tinham exatamente o mesmo comprimento, e contornavam o tronco numa espiral ascendente. No nível mais baixo, projetavam-se para a esquerda; um pouco acima haviam mudado de direção, apontando diretamente para os observadores. Mais acima ainda na espiral, os galhos apontavam para a direita e, após mais uma meia-volta, passavam a apontar para a esquerda de novo. Essa espiral de galhos continuava pela árvore acima até sumir de vista na folhagem de outras árvores. A luz baixa do sol projetava uma sombra da árvore das fases na superfície de pedra que se erguia atrás dela e, nessa sombra, os galhos que apontavam em direção à pedra ou em sentido contrário tinham seu tamanho reduzido. O contorno da sombra dos galhos produzia uma linha ondulada, muito parecida com a que o Sabichão de Lata havia exibido na tela em seu peito.

— Não é fácil mostrar a forma apropriada na minha tela porque ela é plana. Mostrei simplesmente uma projeção, uma espécie de sombra ou visão lateral. — O tom prosaico do Sabichão de Lata não traía vestígio algum de pedido de desculpas. — A probabilidade de se encontrar a partícula em um ponto qualquer não depende da fase. Só o tamanho da amplitude importa. Para esta onda, as amplitudes (como os galhos da árvore), têm todas o mesmo comprimento. A probabilidade é a mesma em toda parte para uma amplitude como essa, de momento e comprimento de onda definidos. A partícula pode ser encontrada igualmente em qualquer lugar ao longo desta onda. Sua amplitude se estende de um lado a outro. A partícula poderia ser encontrada em qualquer ponto de seu infinito comprimento, e, portanto, não está em parte alguma. Não existe nenhum ponto em que você possa dizer: "É mais provável que a partícula esteja aqui."

— Mas uma partícula certamente tem de estar em algum lugar! objetou Dorothy. — Talvez, como vocês dois estão me dizendo, sua posição seja realmente incerta. Pode ser um pouco indistinta, mas tem de estar em algum lugar!

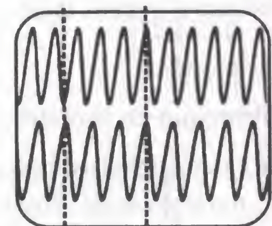
Neste ponto o Espantalho entrou na discussão. — Sou uma espécie de especialista em observação, e posso lhe garantir que quando você tem de fato uma partícula com um momento definido, seu comprimento de onda é constante e não há maneira de descobrir, a partir da amplitude, onde ela está. E como a amplitude é tudo que você pode saber, isso significa que a partícula poderia estar em qualquer lugar.

— Isso é um absurdo! Dorothy insistiu. — A posição de uma partícula pode ser um pouquinho vaga, mas mesmo assim você pode fazer alguma idéia de onde ela está. Se meu almoço está numa marmita, posso não saber exatamente onde estão todos os seus átomos, mas sei muito bem que estão na marmita e não espalhados pelo Kansas inteiro.

— Com certeza, respondeu o Espantalho amavelmente. — Isso é inteiramente verdadeiro. Mas o caso que mencionei foi o de uma partícula com um só, um único momento. Você não poderia dizer nada sobre a posição de uma partícula como essa, mas os átomos de seu almoço — e na verdade outras partículas em geral — não têm um único momento. Têm uma mistura de momento, exatamente como os dançarinos da Dança das Interferências a que você assistiu. E, exatamente da mesma maneira, suas amplitudes variam de um lugar para outro por causa de interferências.

— É isso que estou dizendo, o Sabichão de Lata recomeçou com sua voz monótona. — A amplitude não é uma única onda de momento. É um pacote de ondas. Até você medir a posição, pode falar apenas de probabilidades. Poderia dizer que uma partícula está "aqui" e não "ali" se sua probabilidade fosse maior "aqui". Deve haver um pico na distribuição de probabilidades. Deve ser extremamente provável que a partícula esteja perto de um lugar particular. Essa onda de momento de que falamos é a mesma em toda parte, e deve estar concentrada de alguma maneira num lugar. Pode ser grande ali e se enfraquecer de ambos os lados. Isso pode ocorrer por causa da interferência. Veja o que acontece se somarmos duas ondas de comprimento ligeiramente diferentes.

Enquanto ele falava, uma segunda linha ondulada apareceu debaixo da primeira em seu monitor de peito. Parecia quase igual, mas uma observação mais atenta mostrava que seus picos eram um bocadinho mais afastados. Isso foi evidenciado quando a segunda onda se elevou na tela até se sobrepor à onda original, e então o Sabichão de Lata mostrou a soma das duas. Agora o tamanho dos meneios para cima e para baixo mudara de um lugar para outro. No centro, onde tinham estado em fase, as duas ondas se somaram, e o resultado foi muito maior do que antes. O tamanho das ondulações encolheu à medida que se afastavam do centro até que, a certa distância de cada lado elas se desvaneceram por completo. Isso ocorreu onde as duas ondas tinham estado tão desencontradas que ficaram completamente fora de fase e cancelaram-se uma à outra. Mais adiante dos dois lados, a onda total começava a crescer de novo, até ficar outra vez tão grande quanto no centro. Isso ocorria onde as duas ondas estavam desencontradas por um ciclo completo, de modo que interferiram construtivamente mais uma vez.

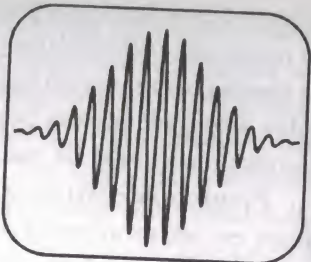


— Agora a probabilidade é maior no centro. Lamentavelmente, no entanto, ela é igualmente grande numa série de posições de ambos os lados do centro. Com uma amplitude como essa, a partícula pode não estar em toda parte, mas tem igualmente probabilidade de estar numa sucessão de diferentes lugares. Uma sucessão infinita. Essas séries de picos que você obtém com a adição de duas ondas são conhecidas como "batidas". Uma partícula que deve estar numa região particular tem de ter apenas um pico na sua amplitude. De certo modo deve perder os outros picos. Isso pode acontecer se mais ondas forem acrescentadas.



Na tela, mais ondas apareceram e subiram para se combinar com a soma original. Todas estavam em fase no centro, e ali o pico foi ficando cada vez maior a cada nova adição. Como todas as novas ondas tinham comprimentos diferentes, elas ficaram descompassadas em diferentes lugares dos dois lados e re-

duziram os outros picos. Com rapidez crescente, um número cada vez maior de ondas foi acrescentado ao monitor, até que restou somente o pico central. As oscilações de ambos os lados foram tendo seu tamanho suavemente reduzido e, em posições suficientemente afastadas do pico, declinaram a ponto de praticamente desaparecer.



— Uma amplitude como esta lhe revela onde está a partícula. Está mais provavelmente na região de pico. Somente nela a probabilidade é grande. Se o pico fosse mais estreito, você saberia ainda melhor onde está a partícula. Só se pode ter um pico como esse quando ondas de diferentes momentos foram combinadas. Para obter um pico mais estreito, você precisa ter uma série ainda mais ampla de momento. Nesse caso eles entram em descompasso mais rapidamente.

O Princípio de Incerteza de Heisenberg[1]

Este é outro dos mais notáveis resultados quânticos

A relação de De Broglie entre momento e comprimento de onda é um fato experimentalmente observado. Não seria possível provar de antemão que ela *deveria* ser assim, mas obviamente é. Ela tem a conseqüência discutida aqui pelo Sabichão de Lata – que a posição e o momento para um estado, juntos, são incertos. Isto não significa simplesmente que *nós* não sabemos quais são. A natureza também não sabe; os valores são eles próprios imprecisos e indefinidos.

O Princípio de Incerteza de Heisenberg vincula a imprecisão na posição, Δx, e a imprecisão no momentum, $\Delta \rho$.

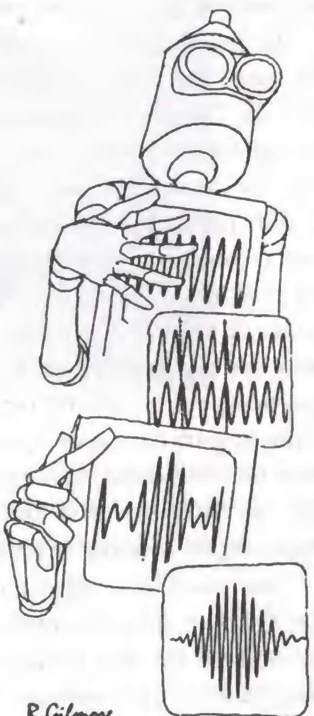
$$\Delta \times \Delta \rho = \frac{\hbar}{2}$$

(Isto é freqüentemente escrito $\Delta \times \Delta \rho \rangle \frac{\hbar}{2}$. O sinal de "é maior do que" significa simplesmente que é sempre possível estar *mais* incerto acerca de algo do que é teoricamente necessário.)

1. Pessoalmente, considero que isso deveria ser chamado de Relação de Incerteza. Não se trata realmente, em si mesmo, de um princípio separado, porque pode ser inteiramente derivado das propriedades ondulatórias das amplitudes quânticas. Há, no entanto, duas escolas de pensamento a este respeito: *eu* não penso que isso deveria ser chamado de princípio e *todos os demais* pensam que deveria. Por conseguinte, refiro-me a ele como princípio no texto.

— Acho que não estou acompanhando muito bem o que você está dizendo, ou melhor, *por que* está me dizendo isso. Que tem tudo isso com a maneira como vi a amplitude daquela partícula se comportando? A partícula devia certamente estar em repouso, mas pareceu se espalhar em todas as direções enquanto eu a observava.

— Isso é exatamente o que nosso amigo metálico esteve lhe dizendo, declarou Espantalho. — Ele acaba de dizer que nenhuma partícula pode ter um único momento, o que significa que não pode ter uma única velocidade. Isso se aplica também a uma partícula estacionária. Você não pode ter uma partícula completamente estacionária — pelo menos não se você sabe aproximadamente *onde* ela está. Qualquer tipo de restrição na posição traz consigo uma dispersão no momento. Obviamente, se houve uma série de momentos, nem todos eles podem ser zero. A partícula vai, por assim dizer, mover-se "furiosamente em todas as direções". Vai se dispersar.



Quando o Espantalho terminou de falar, parecia não haver mais muito a dizer sobre o comportamento de partículas em movimento, e os três companheiros seguiram caminhando pela estrada. Dorothy estava remoendo em sua mente o que tinha ouvido. Tudo aquilo parecia muito estranho, e ela não tinha certeza de estar realmente compreendendo a conexão entre posição e movimento.

* * * * * * * *

Seguindo viagem, chegaram a um lugar onde uma fenda profunda se abria na estrada. Ela separava duas planícies de aparências muito diferentes. De um lado da fissura, o solo era calmo, plano e sem traços característicos a não ser pela espécie de malha que o cobria, mais ou menos como a grade de uma folha de papel quadriculado. Do outro lado da linha divisória tudo era atividade. Era como se um vento forte estivesse soprando através de um capinzal. Linhas de diferentes

comprimentos passavam pela superfície, balançando e rodopiando em todas as direções dando intensa impressão de movimento.

Dorothy comentou o contraste entre as duas áreas, e o Espantalho, sempre prestativo, respondeu: — Essas são as regiões da *posição* e da *atividade*, de *ser* e de *tornar-se*. Estão muito próximas aqui, opondo-se e completando-se uma à outra incessantemente.

Ao longo do meio da profunda divisão entre os dois campos estendia-se uma corda esticada e, à distância, Dorothy viu uma figura minúscula andando sobre ela. Quando a figura se aproximou, viu que se tratava de uma pessoa magra, angulosa, vestindo uma malha colante enfeitada com o ubíquo símbolo $\hbar$. Uma divisão vertical corria pelo centro de seu corpo, com cores contrastantes dos dois lados. Sua malha também tinha cores diferentes de cada lado, assim como o cabelo — escuro de um lado e claro do outro — e o rosto, que parecia uma máscara, dividido de maneira semelhante. Caminhando com cuidado, ela veio na direção de Dorothy, oscilando ligeiramente de um lado para outro ao ajustar seu equilíbrio. Trazia uma vara comprida que segurava horizontalmente e, quando pendia para um lado ou para outro, a vara se desviava para o campo da *posição* ou para o da *ação*. Quando estava na horizontal, a vara se estendia igualmente dos dois lados, mas quando se inclinava para um lado, encolhia nessa direção, tornando-se mais localizada e mais bem definida. Nessas ocasiões, em compensação, tornava-se muito mais comprida e indefinida do outro lado.

Esse indivíduo chegou ao ponto em que sua corda cruzava a Estrada dos Tijolos, e passou para esta diante de Dorothy e seus companheiros.

— Bom dia, boa tarde ou boa noite, conforme seja o caso, disse, fazendo uma reverência profunda que torceu todo o seu corpo num ângulo implausível. Sua voz era uma espantosa mistura de baixo profundo e tenor alto, e as forças relativas dos dois componentes mudavam de tempo em tempo.

— Não sabe que horas são? Dorothy perguntou com certa surpresa.

— Bem, devo admitir que estou um pouco incerto. Certo grau de incerteza é a regra geral aqui, como você talvez saiba. A posição e o momento de uma partícula vão ter sempre, digamos, certa incerteza. Você tem de ajustar seu pensamento para aceitar isso. Pode lhe parecer estranho de início, mas minha especialidade é ajustar entre latitude em posição e latitude em momento. Sou conhecido como o Acrobata Ajustador.

— Acabam de me contar como as partículas têm essa posição e momento espalhados, mas devo dizer que isso ainda me parece muito esquisito, disse Dorothy. — Certamente uma partícula tem de estar numa posição particular e não em qualquer outra. Isso é óbvio.

— Se não se importa que eu o diga, essa parece uma visão muito antiquada para alguém tão jovem, respondeu o Acrobata. — Definitivamente vitoriana, de



fato. A idéia de que todas as pessoas e coisas devem ter sua posição própria e deveriam ser sempre encontradas nela está completamente fora de moda agora. Estamos vivendo em tempos muito mais livres e fáceis. A posição de uma pessoa ou de uma partícula é o que essa pessoa faz dela.

— Não se trata da mesma coisa em absoluto, disse Dorothy. — Com certeza você está falando sobre *posição social*. Nós certamente não nos preocupamos com isso lá no Kansas. A posição de uma coisa no chão é muito diferente. Ela tem de estar num ponto e em nenhum outro. — Dorothy teve de se conter para não bater o pé para sublinhar sua convicção sobre o assunto.

— Pois bem, não vejo como você pode dizer isso, mesmo no Kansas. Olhe para aquela poça, por exemplo. — O Acrobata apontou para uma poça comum do lado da estrada. Era uma poça bem grande, mas Dorothy não a notara antes. Desconfiou que aparecera de repente para participar da conversa, mas mesmo assim parecia bastante comum. Dorothy comentou esse fato.

— É isso mesmo. Uma poça comum, na verdade. Você pode me mostrar exatamente onde ela está? Pode apontar aquele ponto singular, único, em que a poça está localizada?

— Bem, não posso. — Dorothy admitiu. — As poças não são assim. Espalham-se sobre uma área, é verdade. Mas com as partículas é diferente, apressou-se em acrescentar, porque suspeitava que estava sendo induzida a fazer uma declaração que o outro depois distorceria para provar seu ponto de vista.

O tamanho da $\hbar$

Pode lhe parecer que o Princípio da Incerteza é absurdo porque você mesmo pode constatar que as coisas *não* se comportam assim. Um pequeno grão de poeira *vai* ficar pousado exatamente onde você o deixa, ao que parece indefinidamente, sem nenhum espalhamento como este descrito aqui. A dificuldade que todos temos está em compreender exatamente quão *pequena* $\hbar$ realmente é.

Considere um grão de poeira com um centésimo de milímetro de lado a lado, o que é certamente o menor tamanho que você é capaz de ver, e considere a *incerteza* Δx na posição dele como sendo seu tamanho também. Quando você calcula a velocidade correspondente ao momento $\Delta \rho$ dada pelo Princípio da Incerteza

$$\Delta \times \Delta \rho = \frac{\hbar}{2}$$

verifica que, para observar o grão movendo-se por uma distância tão pequena quanto seu próprio diâmetro (certamente a menor distância que você teria condições de observar), você precisaria de ter estado observando-o desde a metade da era dos dinossauros. Mesmo que não se distraísse nesse meio tempo, deveria levar em conta outros grandes efeitos como a deriva dos continentes.

Velocidades como essa dificilmente parecem dignas de preocupação, mas o efeito se torna mais significativo quanto menor é o objeto. Os átomos são *muito pequenos*. Os elétrons num átomo ganham velocidade de cerca de 1% da velocidade da luz, exclusivamente com base no fato de estarem contidos nas pequenas dimensões do átomo.

— Pode estar assim tão certa? o Acrobata a desafiou. — Você conhece bem as poças, mas como pode estar tão segura a respeito das partículas? As posições delas podem ser bastante exatas na escala grande de sua experiência normal, mas aqui na escala $\hbar$ elas não são. Estão espalhadas, como a sua poça. São incertas. São indefinidas. Além disso, seu momento é também indefinido e incerto na razão inversa de seu tamanho. Assim são as partículas. É assim que as coisas são aqui. Mas ou menos como isto.

O acrobata tirou então um objeto mole de um bolso oculto e começou a soprá-lo. Parecia ser um grande balão de borracha, que ele depois começou a apertar entre as mãos. Apertou-o tanto que ficou estreito, mas alongou-se para o alto. Apertou-o para baixo, mas ele se espalhou muito para os dois lados.

— Como você vê, se tento tornar o balão menor numa direção, ele fica correspondentemente maior em outra. É o que acontece com a posição e o momento

das partículas. Se você as restringe a uma posição apertada, sua gama de momento se alarga. E se espremer o momento de tal modo a deixá-lo bem definido, a posição da partícula vai ficar ampla e indistinta. Você tem sempre uma troca entre posição e momento.

De repente o Acrobata começou a se movimentar. — Mas chega disto! exclamou abruptamente. — Não posso ficar mais tempo localizado nesta pista. Ela me empurrou demais para o campo da ação e tenho de ir embora. — Assim dizendo, ele saltou na corda retesada do outro lado da estrada e se afastou oscilando celeremente, pendendo ora para o lado da ação, ora para uma posição mais bem definida. Dorothy observou a figura flutuante, dividida, se distanciar até sumir de vista por completo, e depois os três continuaram pela estrada afora.

4
O Leão Confiante

Dorothy e seus amigos andaram mais um bom pedaço ao longo da Estrada dos Tijolos. As duas planícies complementares, *posição* e *atividade*, logo ficaram para trás e, mais uma vez, o caminho passou através de uma mata. Esta era mais densa que a anterior. As árvores apinhavam-se, muito juntas, e o caminho através delas era escuro e vagamente ameaçador. Dorothy sentiu um impulso irresistível de tagarelar, como se isso pudesse agir de algum modo contra a atmosfera lúgubre.

— Tenho certeza de que vai ser interessante quando chegarmos até o Mágico e ouvirmos tudo sobre quarks e outras coisas. Eles sempre me intrigaram. — Isso de fato era uma mentira. Ela nunca tinha ouvido falar de quarks antes, mas parecia ser necessário dizer alguma coisa para quebrar o silêncio ameaçador.

— Eu gostaria de ouvir mais sobre léptons, declarou o Sabichão de Lata.

— E bósons, atalhou o Espantalho, só para mostrar que ainda estava lá.

— Sim, certamente, Dorothy concordou. — Bósons, léptons e quarks, certamente, repetiu. De algum modo depois disto todos se viram cantando:

Bósons, léptons e quarks, que beleza!

De braços dados, iam caminhando pela estrada e cantando em coro:

Bósons, léptons e quarks, que beleza!
Bósons, léptons e quarks, que beleza!

Andavam cada vez mais depressa, embora o som de sua canção servisse de algum modo para dissipar a atmosfera sombria à sua volta.

De repente seu canto foi interrompido.

— Suponho que vocês compreendem que esse agrupamento é incoerente, já que léptons e quarks são ambos tipos de férmions, não é? — uma voz estrondeou perto deles. Olharam em torno, assustados, e viram, numa sombra escura sob as árvores uma silhueta ainda mais escura: um grande contorno negro que se



agigantava acima deles, seu negrume quebrado apenas por uma fileira de dentes brilhantes. Quando a forma se moveu na direção deles, agarraram-se uns aos outros com força. Bem na sua frente, adiante no caminho, havia um enorme leão que se aproximava sorrateiro. Enquanto os três se apertavam uns contra os outros tremendo de medo, o leão foi rastejando até onde estavam e sentou-se ao lado deles, erguendo-se sobre as patas traseiras. Passou afavelmente seus pesados antebraços pelos ombros deles e deu um largo sorriso dentuço. Seus óculos de aro de chifre refletiam a luz. Na sua ansiedade, não tinham notado esse detalhe antes.

— Permitam que me apresente, disse cordialmente. — Sou, como talvez tenham notado, um leão. Ivo C. Leão, a seu serviço. O C significa *Confiante*, acrescentou confidencialmente.



— Então seu nome completo é Ivo *Confiante* Leão, observou o Espantalho.

— Exatamente! rugiu o Leão.

— O que era mesmo que você estava dizendo sobre bó-



sons e férmions? perguntou Dorothy, falando para controlar seu nervosismo. — Acho que ainda não ouvi nada sobre eles.

— Ora veja, isso não pode ficar assim, respondeu o Leão. — A distinção entre bósons e férmions é o que há de mais básico em matéria de partículas. Eu próprio poderia, é claro, lhe explicar isso. Você vai descobrir que não há quase nada que eu não possa explicar, acrescentou, sem nenhuma falsa modéstia. — Precisamente agora, porém, poderia ser melhor para você ouvir isso do Falsbador. Ele está prestes a iniciar sua performance de sempre. Venham por aqui.

Assim falando, Ivo C. Leão pôs-se a andar, caminhando sobre as quatro patas com um movimento suave, furtivo. — Acho que não seria *capaz* de andar desse jeito, Dorothy falou com seus botões. Quando olhou para seus outros dois companheiros, o Sabichão de Lata andando aos solavancos como uma máquina (o que obviamente era) e o Espantalho balançando freneticamente como se pendurado por cordões invisíveis, ela concluiu que não conseguiria andar daquelas maneiras tampouco, então simplesmente foi seguindo tão bem quanto podia.

Férmions e bósons

A principal divisão das partículas é a que separa férmions e bósons.

Os férmions obedecem ao Princípio de Exclusão de Pauli (que é discutido neste capítulo); os bósons não o fazem.

Os bósons tem um spin (uma forma de rotação interna discutida no próximo capítulo) que é zero ou um múltiplo da unidade básica $\hbar$, ao passo que os férmions possuem tipicamente um spin de $\frac{1}{2}\hbar$.

Os férmions são conservados; não é possível criar um férmion sem um antiférmion apropriado. Os bósons não são conservados. Se houver energia suficiente para fornecer a massa de repouso (veja o capítulo 6), um bóson pode ser criado isoladamente.

Depois de vencer um curto trecho, chegaram a uma clareira na mata. Havia várias pessoas sentadas ao redor com a expressão expectante de quem prevê que terá um divertimento sem grande custo ou esforço de sua parte. No centro da clareira estava postada uma figura alta e magra, vestindo um traje brilhante, de

aparência medieval, com um colete acolchoado e meias multicores. Segurava com determinação um instrumento de cordas, muito parecido com um alaúde, como se estivesse prestes a tocá-lo.

— Olhem só o Falsbador! anunciou o Leão.

— Sinto muito, confessou Dorothy, mas não sei o que é um Falsbador.

— Ora, já ouviu falar de trovador,[1] não é?

— Claro que sim, disse Dorothy, que era muito chegada a romances históricos. — É um menestrel que perambula, que vai de um lugar para outro cantando baladas sobre as novidades importantes. Acredito que era assim que as notícias eram divulgadas quando ainda não existiam jornais.

— Certíssimo! replicou o Leão. — Agora, se isso é um trovador, você pode adivinhar o que vem a ser o Falsbador!

— Ah, está querendo dizer que as notícias que ele canta *não* são verdade? Dorothy perguntou num sussurro, de modo a não magoar o Falsbador.

— Bem, não, não é isso. Os fatos básicos que ele canta são corretos, mas ele os narra muito mal. Muitas vezes é quase ininteligível — o Leão cochichou de volta. Infelizmente, ele não pegou a idéia de que o objetivo de sussurrar é não ser ouvido, e sua voz estrondeou quase tão alto quanto antes. — E tem mais, ele não é capaz de cantar, acrescentou. O Falsbador pareceu obviamente ofendido, mas conseguiu se conter e anunciou que iria apresentar "A balada dos Bósons e dos Férmions". Começou cantando com uma voz aguda, de taquara rachada:

Vou lhes contar uma história sem jamais sair do tom.
Parece esquisito, mas vou falar sobre o bóson e o férmion.
O Universo repousa — ninguém aqui adivinha ou responde —
Muito no jeito de essas partículas brincarem de "esconde-esconde".
Esse jogo cria uma distância, como um de seus efeitos,
Que não fica atrás da que outrora opôs Montéquios e Capuletos.

— Entende agora o que falei sobre as canções dele? cochichou o Leão.

— Acho que estou vendo o que você queria dizer, Dorothy cochichou de volta. Os olhos do Falsbador dardejaram na direção do Leão, mas ele continuou cantando.

Não faltam partículas com todos os nomes, todas elas iguais (você me atrapalha
quando ruge assim, meu rapaz).
São tão parecidas quanto duas ervilhas; de fato são muito mais.

1. Perde-se na tradução a homofonia de *troubador* e "true/bador" (*true* = verdadeiro), que permite o jogo de palavra com "Falsbador". (N.R.T.)

Assim é verdade que de começo você as confunde, e se uma delas trocar de lugar
com a companheira, então
Não há como saber — a ação é secreta — que amplitude se agrega à adição.
Qualquer partícula ou sua irmã pode permutar com qualquer outra — todas
têm direito ao seu lugar.
Cada permutação é incluída e, como acabo de contar, a amplitude vai crescer,
depressa e sem parar.

— Acho que não consigo entender patavina disso, Dorothy sussurrou para o Leão.

— Isso não me surpreende, o Leão rugiu de volta para ela. É possível que *imaginasse* estar sussurrando, mas o que fez foi abafar por completo o canto débil do Falsbador, que parou abruptamente e fuzilou o Leão com os olhos de novo. Todos os membros da platéia do cantor, no entanto, se viraram e se prepararam alegremente para ouvir o Leão em vez do bardo. — Vocês podem saber, recomeçou este, que todas as partículas de determinado tipo são idênticas. Mas não quero dizer com isso simplesmente parecidas, nem mesmo muito difíceis de se distinguir. Quero dizer verdadeiramente idênticas. Um elétron é um exemplo típico de férmion, e um elétron é *exatamente* igual a qualquer outro. Como todos os elétrons são absolutamente idênticos, falamos em geral *do* elétron, porque a descrição de um deles é uma descrição completa de todos, ainda que haja grande quantidade de elétrons.

— Se os elétrons são completamente idênticos, será que isso significa que devem todos estar fazendo a mesma coisa? Que devem todos se comportar da mesma maneira? perguntou Dorothy, que estava dando tratos à bola para entender como coisas que eram exatamente iguais podiam diferir de algum modo.

— Não, não, de maneira alguma! Todo elétron é igual em si e por si mesmo, e não há meio de distinguir um do outro, mas isso não significa que têm de se comportar da mesma maneira. A situação lembra um pouco a dos gêmeos idênticos. Um gêmeo pode estar sentado obedientemente na classe e o outro matando aula para jogos de futebol. Estão fazendo coisas diferentes, muito embora não se consiga saber *qual* gêmeo está em que lugar. Os elétrons são muito mais similares que gêmeos. São completamente idênticos e não há maneira possível de distingui-los. Apesar disso, não fazem coisas idênticas. É preciso descrever a coleção de elétrons como um todo por uma função de onda, ou amplitude, de múltiplos elétrons. "Nenhum elétron é uma ilha", você poderia dizer. A identidade dos elétrons tem conseqüências importantes para sua amplitude, como você verá.

O Leão *Confiante* fez uma pausa para pôr seus pensamentos em ordem e continuou em seguida: — Os elétrons são férmions, mas isso se aplica também aos bósons. Um bóson típico é o fóton, a partícula da luz, e um fóton é exatamente igual a qualquer outro, a não ser por sua energia.

— Então a luz tem partículas? perguntou Dorothy com certa surpresa.

— Tem, não há dúvida de que tem. O fóton é a partícula da luz, como eu disse. De fato, eu deveria dizer que é a partícula da radiação eletromagnética. Essa radiação se manifesta numa ampla variedade de energias, que vão desde ondas de rádio de energia muito baixa a raios X de alta energia e além destes aos raios gama. Seus olhos só podem ver fótons que estão numa pequena faixa de energia, e um raio de luz é uma torrente desses fótons. O fóton é uma partícula tão boa quanto qualquer outra, com a diferença de que não tem massa. Você pode dizer que é mesmo *light*. — Ao dizer isto, o Leão estrondeou numa gargalhada. Dorothy já tinha ouvido falar de pessoas dando gargalhadas estrondosas, mas nunca experimentara isso antes. Mais do que depressa pôs as mãos sobre os ouvidos para protegê-los até que o som cessasse.

— Como eu ia dizendo, o Leão continuou depois de retomar o fôlego, não há maneira, absolutamente nenhuma, de distinguir um elétron do outro. O esconderijo perfeito para um elétron é em meio a uma porção de outros. Não é possível dizer qual era o elétron original. Na verdade, a própria idéia de elétron *original* não tem muito significado, porque nunca se pode saber se dois elétrons trocaram de lugar. É sempre inteiramente possível que dois deles tenham trocado de lugar, e se é *possível*, é *compulsório*. Como você deve saber a esta altura, a amplitude total tem de incluir todas as possibilidades e portanto tem de incluir essas *duas* opções. A amplitude de um número de elétrons deve incluir um termo para *todo* e *qualquer* par de elétrons trocar de lugar um com o outro, simplesmente porque uma troca como essa é *possível*.

— Isso parece ser um número espantoso de termos! Dorothy disse, muito admirada.

— Oh, é isso mesmo, isso mesmo. Se temos um grande número de elétrons, como geralmente é o caso, o número de pares possíveis é realmente enorme, mas apesar disso é preciso considerar cada par. A amplitude global deve ser uma soma de termos que inclui *todas* as opções possíveis. É assim que a Natureza funciona.

O Leão fez uma pausa momentânea com uma expressão de ampla satisfação. Estava muito disposto a continuar, mas o Falsbador aproveitou a oportunidade para retomar sua canção:

Quando partículas se rearranjam você não nota a mudança;
as probabilidades como tais não se alteram com sua dança.

"Mas e a fase? Que foi feito dela?" você pode perguntar.
E a resposta talvez venha a lhe desconcertar.

Quando partículas permutam, a fase pode mudar. Se permutar de novo, ela muda mais fortemente.
Mas permutar duas vezes não traz mudança alguma; com isso se restabelece o estado inicial, somente.
Assim podem ver por si mesmos que uma opção aberta para a mudança da fase é não mudar nada.
Mas se ela muda, então para dobrar a extensão, um ciclo completo é a coisa a ser efetuada.

Os bósons são de tal modo arranjados que, quando permutam, sua amplitude não é em nada alterada.
Os férmions, porém, mostram uma diferença, talvez já por vocês esperada.
Eles mudam de fase, mas de maneiras limitadas, a amplitude mudando seu sinal como uma meia-volta confere uma inversão que percorre todo o caminho que vai de um mais a um menos.

Talvez me perguntem, acerca minha canção: será que isso tem importância? A resposta é sim, decididamente!
Pois dessa mudança de sinais depende a vida de vocês, a minha, todo o espetáculo do Cosmo, realmente.
Disso dependem os átomos, pois do contrário mergulhariam no caos e na completa confusão,
Destino que foi evitado quando Pauli inventou seu Princípio de Exclusão.

Dorothy estivera ouvindo tão atentamente quanto podia. Tinha a impressão de que alguma coisa importante estava sendo dita. Por mais que tentasse, porém, não conseguia atinar com o que era. Disse isso ao Leão, que sacudiu sua enorme cabeça enquanto lançava um olhar de piedade para o Falsbador.

— Eu já esperava por isso. Como essa criatura consegue fazer uma argumentação perfeitamente direta parecer tão contorcida, eu não sei. Devo me dispor a lhe emprestar meu livro sobre o assunto. — O Leão enfiou a pata em algum lugar de sua copiosa juba e tirou de lá um livrinho com que acenou à sua volta para dar ênfase. Dorothy pôde ver que era intitulado *Férmions e bósons — A grande linha divisória*, da autoria de Ivo C. Leão.

Mais uma vez, o Falsbador, abafado pela voz tonitruante do Leão, sentou-se deprimido no chão da floresta e começou a dedilhar a esmo seu alaúde enquanto lançava um olhar enfurecido para o Leão. A platéia que antes lhe pertencia transferiu sua volúvel atenção para aquele animal tão atrevido.



— É tudo bastante simples, na verdade, continuou o Leão, inteiramente alheio aos olhares sombrios que o Falsbador lhe dirigia. — Como eu ia dizendo, quando se trocam dois elétrons num grupo, isso não produz nenhuma diferença que se possa detectar. Isso significa que todas as *distribuições de probabilidade* permanecem inalteradas, porque elas indicam o que podemos observar ou medir. A única coisa que poderia mudar é a fase total, porque esta não afeta as probabilidades. Vocês podem descobrir tudo sobre fase neste meu livrinho aqui.

O Leão procurou, aparentemente ao acaso, na vegetação rasteira das proximidades e dali tirou um livro que mostrou a Dorothy. Tinha o título *As amplitudes alguma vez entram em fase?*, de Ivo C. Leão. — Talvez você queira folheá-lo. Não? Bem, quem sabe mais tarde. Pode ser um pouquinho difícil encontrar as páginas certas quando se precisa delas.

O entusiasmo do Leão não arrefeceu ante a relutância de Dorothy em ler seu livro. — De todo modo, no presente caso o número de modos segundo os quais a fase pode mudar quando dois elétrons permutam é um tanto restrita. O que quer que aconteça quando se troca dois elétrons, você sabe que quando os

trocamos *duas vezes* voltamos exatamente para o ponto inicial. Nesse caso não houve *absolutamente nenhuma mudança*, e tudo, mesmo a fase, deve ser como era antes. Isso lhe deixa com duas opções. Uma é que a fase não muda em absoluto quando dois elétrons trocam de lugar. Claramente, nesse caso, *tudo* será exatamente como era antes de os elétrons trocarem de lugar, e tudo fica igualmente inalterado depois que as duas mudanças sucessivas ocorrem. A outra possibilidade é que a fase tenha dado uma volta completa ao final das duas trocas sucessivas. A fase estaria então apontando na mesma direção que antes, e tudo ficaria inalterado. A amplitude seria exatamente a mesma que no primeiro caso, mas lembre-se de que estamos falando do que acontece quando uma partícula é trocada duas vezes. Após *uma* troca, a fase haveria dado somente meia-volta e estaria num estado oposto a seu estado original. As amplitudes nesse caso seriam invertidas, sendo de fato multiplicadas por menos um.

— Assim, como você vê, continuou o Leão, sentando confortavelmente e dando um largo sorriso para a antiga audiência do Falsbador, tem-se duas opções, e estas correspondem às duas classes de partículas: bósons e férmions. A amplitude dos bósons não muda de nenhuma maneira quando eles trocam de lugar, ao passo que a amplitude dos férmions *sempre* muda de sinal.

— Bem, estou certa de que tudo isso é muito interessante, disse Dorothy num tom singularmente desprovido de convicção, mas será que é realmente muito importante que essas amplitudes mudem ou não de sinal?

— SE É REALMENTE IMPORTANTE? rugiu o Leão com uma voz que fez toda a platéia estremecer de susto. — Se é importante? ele repetiu num tom bem mais moderado. — É claro que é. O Falsbador estava muito certo quanto a isso. É *particularmente* importante para os férmions, como logo poderão ver. Os *férmions* sempre têm o sinal de suas amplitudes mudado quando um par deles troca de lugar, mas se esses dois estivessem no mesmo estado, sua troca realmente não teria feito a menor diferença, de modo que as amplitudes ficariam inalteradas. Mas uma amplitude só pode permanecer inalterada depois que mudou seu sinal se ele for *zero.* Em outras palavras, não existe semelhante amplitude. Não *é possível* ter amplitudes que tenham dois férmions no mesmo estado. Esse é o Princípio de Exclusão de Pauli, e você pode calcular o quanto isso é importante! — O Leão fez uma pausa e deu um sorriso radiante e cheio de expectativa para Dorothy.

— Bem, sim, disse Dorothy amavelmente. — Há só um problema, no entanto.

. . . .

Estados e o Princípio de Pauli

Não é fácil traçar a distinção entre estados e amplitudes. Um *estado* significa, na realidade, o que as partículas podem estar "fazendo". Uma amplitude dá a melhor descrição possível do estado.

O Princípio de Pauli afirma então que nenhum par de férmions idênticos – nenhum par de elétrons, digamos – pode estar "fazendo exatamente a mesma coisa".

. . . .

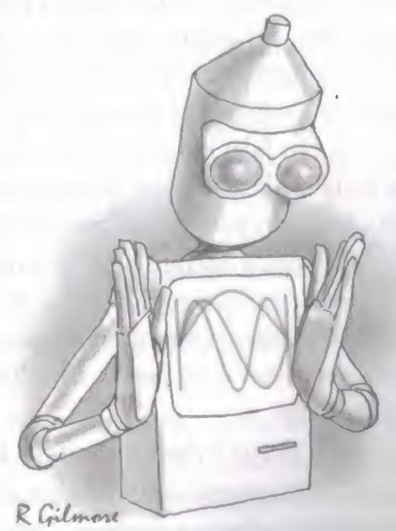
— E que problema é esse?

— O que é um estado?

— Ah! Hum. Sim, respondeu o Leão, bastante surpreso e desta vez quase indeciso. Logo apresentou um livro. A partir de uma rápida olhadela, Dorothy achou que o título era algo como *Num estado certo*, mas obviamente o Leão concluiu que o momento não era apropriado para a obra. A menina o ouviu murmurar alguma coisa sobre "nunca consigo achar a página certa, de todo modo", embora no caso do Leão um murmúrio parecesse uma trovoada. Ele deu sumiço no livro quase imediatamente.

— Certo, disse ele, quando sua autoconfiança natural se restaurou. — Bem, um estado é realmente o que diz ser. É aquele estado ou condição em que uma partícula se encontra. Mais especificamente, quando uma partícula como um elétron é aprisionada dentro de um átomo, há estados discretos de energia. É melhor eu explicar isso, acrescentou rapidamente, antes que Dorothy pudesse fazer uma pergunta.

Rastejou até o Falsbador, que continuava sentado dedilhando a esmo seu alaúde, e, pronunciando sem convicção palavras que poderiam ter sido um pedido de desculpas, tomou o instrumento da mão do menestrel desalentado. Esticou gentilmente uma garra grande e escura e puxou uma corda, produzindo uma nota grave. — Esta corda dá uma freqüência que depende do seu comprimento. A mesma corda pode produzir notas diferentes, embora somente de uma série limitada.

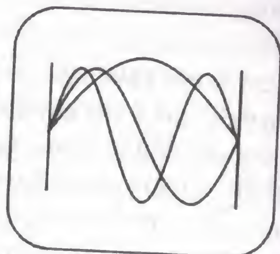


Com outra garra, tocou brevemente o centro da corda enquanto a puxava de novo. Dessa vez a nota foi muito mais alta, sendo uma harmônica da primeira. — Portanto, aí está, disse, com um ar conclu-

sivo bastante inadequado, embora Dorothy não tivesse nenhuma certeza de que *estivesse* ali ou de fato em *qualquer lugar* em particular.

— Talvez eu possa ajudar, observou o Sabichão de Lata, cambaleando ao encontro deles e ligando o visor da tela em seu peito. Mostrou um par de linhas verticais, uma de cada lado, unidas por uma linha ondulada que atravessava a tela e era muito parecida com as ondas que o Sabichão mostrara mais cedo.

— Você vê uma onda obstruída nos dois lados. Isso mostra como a amplitude de um elétron ou de outra partícula pode variar entre dois pontos além dos quais não pode ir, talvez porque haja algum tipo de parede. Não há amplitude de alguma nos pontos finais, pois a amplitude não pode prosseguir além deles. Isso limita as opções entre elas. O caso mais simples tem um ponto de vibração máxima — um pico na amplitude — antes que a amplitude diminua rumo ao ponto fixo na outra extremidade. Esse caso tem a mais baixa freqüência possível. Outra possibilidade seria você encaixar dois picos entre as extremidades, o que lhe dá uma onda com metade do comprimento de onda e o dobro de freqüência. A possibilidade seguinte é três picos. E assim por diante. Você tem uma seqüência de possibilidades, cada uma com uma freqüência maior.



— Isso está correto, interrompeu o Leão. — Se você se lembrar que a freqüência é proporcional à energia, poderá ver que quando partículas são encerradas num espaço pequeno, suas energias devem escolher a partir de uma série de valores distintos. Partículas que estão inteiramente livres para perambular por onde bem entendem estão livres também para ter qualquer energia que queiram. Capture-as na armadilha de uma região pequena, contudo, e elas passam a poder ter somente uma energia da série que é correta para essa região.

— Por falar em armadilha, disse o Espantalho, esta me parece ser a espécie de terra onde se podem esperar invasores da propriedade alheia. Se olharmos com atenção, poderemos encontrar algumas armadilhas espalhadas.

Ele seguiu adiante pelo caminho com seu gingado típico, e Dorothy e seus companheiros o seguiram. Não tinham ido muito longe quando o Espantalho deu uma guinada e saiu bruscamente da estrada. — Ali está, disse, apontando para uma espécie de panela cilíndrica enterrada no chão. — É isto que estamos procurando.

— E o que é isso? perguntou Dorothy.

— Ora, é uma armadilha para férmions silvestres. — Mal ele acabara de falar, todos se acharam de repente em meio a uma multidão de listras borradas, interligadas, que se estendiam pela mata e iam além da armadilha enterrada. — E há um bando de férmions passando. Você pode reconhecer a maneira típica como a fase varia para partículas livres quando elas se movimentam.

A trajetória da maioria das partículas contornava a armadilha. Algumas passavam sobre ela, mas quase todas apenas faziam um desvio por um lado ou por outro e seguiam em frente. Vez por outra, a trajetória de uma partícula se detinha abruptamente na armadilha, com um breve lampejo enquanto algo brilhante era lançado para fora.

— Em sua maioria os férmions escapam por completo ou ficam no máximo, elasticamente dispersos, comentou o Espantalho. — De vez em quando um é capturado e cai num nível de energia mais baixo dentro da armadilha, no qual fica preso a partir de então. Perde energia nesse processo. De fato, a única razão por que *fica* preso é não ter energia suficiente para escapar e se movimentar livremente. Já que a energia tem de ser conservada, como você bem sabe, a energia que o férmion perdeu é arrebatada por um fóton, uma "partícula de luz". Essa armadilha tem um formato comum, do tipo poço quadrado íngreme dos lados, continuou o Espantalho. — Eles fazem as armadilhas tão profundas quanto podem, de modo que elas contenham a maior quantidade de níveis de férmions possível. Um nível não pode conter muitos férmions, por causa do Princípio de Pauli de que você acaba de ouvir falar. — Dorothy lembrava o que o Falsbador e o Leão tinham conseguido lhe dizer sobre o Princípio de Pauli: que somente um férmion podia existir em qualquer estado. — A armadilha é feita tão profundamente possível também para reduzir a perda por tunelamento quando a levantam.

Tunelamento era mais uma palavra que Dorothy nunca ouvira, mas antes que pudesse perguntar sobre ela, eles ouviram sons furtivos de passos. O Espantalho empurrou seus companheiros de viagem para trás de alguns arbustos, tirando-os de vista momentos antes que um grupo heterogêneo de pessoas mal-ajambradas surgisse da direção da estrada. Se eram invasores, como Dorothy supôs a partir do que o Espantalho dissera, presumivelmente estavam também interessados em agir secretamente. De fato, avançavam de maneira exageradamente sub-reptícia, um ou outro deles parando a cada momento para pôr o dedo sobre os lábios. Infelizmente, sempre que um fazia isso os outros trombavam contra ele, e todos caíam no meio dos arbustos com um bocado de agitação e ruído de galhos partidos à sua volta.

Essa barulhenta ação furtiva servia para retardar o avanço deles, mas, apesar disso, o bando de saqueadores acabou por chegar até o buraco, em torno do qual todos se amontoaram. Sua aproximação tinha sido ainda mais atrapalhada pelas pás e enxadas que carregavam nos ombros. Quando o grupo inteiro começou a

escavar em torno do poço, Dorothy percebeu qual era seu objetivo. Cada golpe desferido por uma pá produzia um som peculiar, de rasgão. Dorothy fez um comentário sobre isso. — Que coisa é essa em que estão cavando?

— A armadilha estava enterrada no tecido do espaço-tempo. É um material muito viscoso, esse.

O bando de facínoras pareceu ignorar por completo essa troca de palavras e se agachou em torno do túnel, lutando para erguê-lo para um nível de energia mais alto, de modo que ficasse acima do nível circundante geral. A armadilha parecia um cilindro profundo, e a gangue segurou-a no alto enquanto se preparava para tirá-la dali. Como estavam em volta do objeto, isso exigia que alguns deles andassem para trás e outros de lado. De início houve completo desacordo com relação a isso, e eles oscilavam para frente e para trás, ocasionalmente girando num círculo completo. Por fim chegaram a certo grau de concordância e foram se afastando, carregando o poço cilíndrico. Então, de vez em quando, à medida que seguiam cambaleando, um férmion despontava através da parede lateral e saía correndo pela da mata, livre novamente.

— Isto é tunelamento, disse o Leão, respondendo à pergunta que Dorothy não estivera prestes a fazer. — Como a energia de qualquer férmion em um dos níveis dentro do poço é menor do que a altura das paredes, um férmion dentro do poço tem energia cinética negativa. Classicamente, isso simplesmente não é permitido. Num estado quântico, uma partícula *pode* ter energia cinética negativa, embora sua amplitude caia rapidamente. Quanto mais alta for a parede, mais negativa será a energia cinética de uma partícula dentro dela e mais rapidamente sua amplitude se reduzirá. Apesar disso, se a parede for fina, ainda pode haver considerável amplitude do outro lado dela, e isso gera a probabilidade de uma partícula que deveria estar aprisionada dentro do poço de fato aparecer do lado de fora, tendo efetivamente *cavado um túnel* através da parede. Quando um poço potencial contém férmions, os níveis mais baixos logo ficam cheios, e férmions que são acrescentados mais tarde são forçados a ir para níveis mais altos, próximos do topo. Ali, não estão tão profundamente aprisionados e podem penetrar as paredes com mais facilidade, de modo que logo começam a abrir túneis. Você pode ler sobre isso no meu livro. — O Leão enfiou a mão na vegetação rasteira e de lá extraiu um livro de capa vistosa com o título *Visões de túneis*, da autoria de Ivo C. Leão.

. . . .

Tunelamento

Esse é um processo puramente quântico. Na física clássica, as partículas não podiam ir onde tivesse energia cinética negativa. Na física quântica, continuam possuindo uma amplitude numa condição como essa. Isso decresce rapidamente com a distância, mas ainda pode dar uma probabilidade pequena mas finita de que a partícula reapareça do outro lado de uma barreira potencial *fina*.

O tunelamento ocorre, por exemplo, no decaimento radioativo α de núcleos de urânio.

. . . .

— Como é que sempre consegue encontrar um exemplar de um de seus livros, a qualquer momento que deseja? Dorothy indagou.

— Oh, há muitos deles por aí. Estão muito amplamente distribuídos. Em geral consigo encontrar um livro, embora nem sempre a página que quero, respondeu o Leão, evasivamente.

Enquanto estavam falando, a gangue dos caçadores clandestinos havia sumido de vista, e até suas exclamações sussurradas de "Pare de empurrar" e "À esquerda, esquerda. Eu disse vá para a esquerda. Oh, desculpe-me, queria dizer para a direita" haviam desaparecido pouco a pouco na distância. Como parecia que mais nada iria acontecer ali onde estavam, os companheiros seguiram viagem através da mata. Ocasionalmente passaram por outros buracos. Alguns eram profundos como a armadilha dos férmions, outros eram mais largos e bastante rasos.

— Estas provavelmente são armadilhas para bósons, comentou o Espantalho. São capazes de conter grande quantidade de partículas sem precisar ser muito profundas, porque todos os bósons vão para o mesmo nível.

— Por que isso acontece? Dorothy perguntou.

— Por que não há nenhum Princípio de Exclusão para bósons, disse o Leão, confiantemente. — Não há razão para que dois bósons não devam entrar no mesmo estado, e assim, naturalmente, eles preferem fazê-lo.

— Não entendo por que isso teria de ser assim, replicou Dorothy. — Mesmo que *possam* entrar no mesmo estado, há alguma razão particular para que *devam* fazer isso?

— Bem, há, na verdade há. Lembre-se de que a amplitude de uma partícula a descreve tão bem quanto é possível descrevê-la e fornece a quantidade relativa de sua presença em qualquer estado ou condição. Uma amplitude pode descrever todas as partículas que estejam presentes. Se duas partículas estiverem no mesmo estado, a amplitude para esse estado é duplicada, em contraste com o caso em que somente uma partícula está nesse estado particular. Como sabe, a probabilidade que têm as partículas de estar em qualquer estado específico é dada pelo tamanho da amplitude ao quadrado, isto é, a amplitude multiplicada por si mesma. Conseqüentemente, duas vezes a amplitude vai dar *quatro* vezes a probabilidade de que

somente *duas* partículas estejam no mesmo estado. Para dez partículas, você teria cem vezes a probabilidade — dez vezes mais do que se cada uma das dez partículas estivesse num estado com sua própria amplitude diferente. Para números maiores de partículas, o estado se torna cada vez mais provável. De fato, quanto mais partículas já estiverem presentes, mais efetivamente o estado suga partículas para dentro de si. Isso é conhecido como Condensação de Bose.

A essa altura, haviam percorrido o caminho de volta até a Estrada dos Tijolos. Enquanto caminhavam, Dorothy falou com seus novos amigos sobre as coisas que lhe haviam acontecido recentemente, inclusive sobre como tinha vindo do Kansas e como tinha sido recebida pela Bruxa da Massa. — Ela me disse que há uma outra bruxa, chamada EM. Moro com minha tia Em. Gostaria de saber se a bruxa tem alguma semelhança com ela. — Dorothy estava começando a sentir saudade de sua tia Em e pensou afetuosamente no seu rosto amável, preocupado, e em seu cabelo grisalho (agora com uma permanente em comemoração à sua visita à cidade).

Seu devaneio foi interrompido bruscamente pelo estrondo de trovões e por um enorme raio que pareceu cair bem ao lado da estrada. Atordoada pelo som e ofuscada pela luz brilhante, Dorothy sacudiu a cabeça para clareá-la. Quando sua visão voltou ao normal, deu-se conta de que havia uma figura ali perto, num ponto onde, um momento antes, não havia nenhuma figura visível. Agora destacava-se diante deles uma mulher esguia vestindo uma longa túnica preta. A um exame mais atento, não parecia na verdade ser especialmente alta, mas apesar disso se avantajava. Sendo alguém capaz tanto de operar dentro da esfera de um átomo quanto de estender seu alcance a galáxias inteiras, seu tamanho aparente era em boa medida uma questão de conveniência social. Podia se destacar tanto quanto quisesse.



Dorothy viu diante de si um rosto pálido com maçãs altas e olhos encapsulados sob sobrancelhas que pareciam raios. Na mão, essa bruxa, pois tratava-se de uma, trazia um bastão feito de relâmpagos, que zunia e crepitava. O bastão era encimado por uma grande bola que reluzia com uma luz azul e emitia faíscas curtas e grossas. Toda a figura estava contornada por uma coroa azul semelhante. Sua boca larga, móvel, contorceu-se com ironia quando ela se dirigiu a Dorothy.

— Criança, eu sou EM!

5

O Jardim Atômico

Dorothy e seus companheiros fitaram espantados a súbita e inesperada aparição da Bruxa da Carga. Para dizer a verdade, somente três deles a estavam encarando. O Sabichão de Lata não encarava coisa alguma, porque a descarga próxima do raio havia posto seu sistema em pane novamente. O Espantalho notou isso e inseriu rapidamente o disco de sistema no "*drive* A", como a mensagem na tela sugeria. O Sabichão de Lata se recobrou com alguma confusão inicial e em seguida também cravou os olhos em EM, que estava lhe lançando uns olhares zombeteiros, com uma sobrancelha arqueada.

Dorothy se sentiu um pouco amedrontada, mas acima de tudo sentiu-se irritada.

— Deveria ter vergonha, disse ela, por implicar com o Sabichão de Lata só porque é o único de nós a ser afetado pela eletricidade.

— Está redondamente enganada, respondeu EM. — Todos e cada um de vocês são afetados pela eletricidade, e num nível muito profundo. Tudo que os cerca no seu mundo é essencialmente elétrico. Se as forças elétricas fossem retiradas os efeitos poderiam ser — desastrosos. Observe.

Apontou um dedo comprido para um seixo na beira da estrada. Ele explodiu imediatamente como uma granada de mão, com um estrondo ensurdecedor. — Isso, disse a Bruxa, é o que aconteceria a vocês no seu mundo se as interações elétricas cessassem. Quando elétrons estão confinados no pequeno espaço de um átomo, eles têm um momento grande, porque estão tão apertados. Se de repente não houvesse mais atração elétrica para mantê-los ligados, eles se dispersariam com a velocidade correspondente, que seria tão grande quanto numa explosão mais convencional.[1]

1. É claro que é de todo impossível suprimir a interação elétrica dessa maneira. Se fosse possível, seria certamente perigoso. NÃO TENTE FAZER ISSO EM CASA.

— Meu domínio se estende sobre todo o mundo e tudo que há nele, continuou a Bruxa. De algum lugar em sua própria pessoa, tirou uma bola indistinta que segurou e depois jogou em direção a eles. Enquanto vinha, a bola encolheu e se multiplicou, encolheu e se multiplicou, para se transformar numa miríade de minúsculos objetos e, finalmente, numa névoa de partículas pequenas demais para serem percebidas. Quando essa névoa os atingiu, fundiu-se com o corpo de Dorothy, misturando-se e por fim tornando-se os átomos de que ele era feito.

— Cada átomo presente em seu corpo é meu. Você é minha porque é feita de átomos, e esses átomos dependem acima de tudo da interação eletromagnética. Tudo que vê à sua volta depende dela. Na verdade, o próprio fato de você *poder* ver depende de mim. O fóton, a própria luz, é a base da interação magnética.

— *Eu sou luz!* ela exclamou, exultante.

Abruptamente fez-se uma labareda de luz que os cercou por todos os lados. Como antes, não conseguiram enxergar nada por alguns momentos depois que seus olhos tinham sido ofuscados pelo brilho intenso. Quando puderam ver de novo, não havia sinal algum da recente visitante. A Bruxa desaparecera.

Continuaram andando, mas, não muito além do ponto em que tinham encontrado EM, depararam-se com um cartaz à beira da estrada.

Produtos do Jardim Atômico
disponíveis agora

todo e qualquer objeto
do mundo inteiro

Intrigados com esse cartaz, tomaram um desvio e entraram no jardim. Um cenário de rica profusão os acolheu. Canteiros apinhados, ocupados por toda sorte de átomos, os envolviam. Num canteiro havia simples Hidrogênio; outro continha todas as variedades de Terra Rara. O Oxigênio proporcionava uma atmosfera refrescante e o Carbono, perto dele, sugeria complexidades inconcebíveis. Por trás de tudo isso havia o cheiro pesado, perigoso, do Urânio.

Ali perto havia uma figura encurvada, parecendo quase tão velha quanto o tempo, zanzando de um lado para outro entre os canteiros. O homem se virou e se aprumou ligeiramente quando os visitantes se aproximaram.

— Arre, vieram para ver alguns dos produtos do jardim? disse.

— Que tipo de produtos tem aqui? Dorothy perguntou.

— Todos os tipos. Pelo menos, temos todo tipo de átomo, e com eles vocês podem fazer tudo quanto queiram.

— Nesse caso, pode me dizer alguma coisa sobre seus átomos? perguntou Dorothy, só para entender com toda clareza o que estava acontecendo.



— Posso sim, com certeza. Basta que venham comigo. Vou começar agora mesmo uma nova fornada de Nitrogênio.

Dorothy e seus companheiros o seguiram enquanto ele seguia trôpego pelo caminho. Ele parou numa área vazia, enfiou a mão num saco que estava carregando e depositou algo no centro do terreno. Não era uma área de terreno vazio, a menina observou, mas sim uma área *completamente vazia.* Fosse o que fosse que o homem tinha posto ali, estava aparentemente isolado numa região de espaço vazio. Ele repetiu a ação várias vezes. Dorothy não conseguiu realmente ver nada, mas tinha certeza de que pusera alguma coisa ali. Perguntou-lhe sobre isso.

— Ora, são núcleos para os átomos. É preciso começar com um núcleo quando se quer um átomo. Como minha avozinha costuma dizer,

Quando um núcleo você plantar
Obterá o átomo que desejar.

Agora, tudo que preciso fazer é alimentá-los com alguns elétrons.

Ergueu uma espécie de lata que estava ali perto, no caminho, e inclinou-a sobre a região que havia semeado. Um esguicho nebuloso caiu da lata, e uma bola indistinta se desenvolveu em torno de cada núcleo que plantara. De início perfeitamente esféricas, à medida que foram crescendo elas se tornaram mais

complicadas, contornadas por lóbulos. Continuaram, contudo, bastante indistintas e sem traços característicos.

— Aí está. Uma rara maravilha de estrutura intricada, vocês têm de admitir.

Mas Dorothy na verdade não concordava. Os átomos ainda lhe pareciam indistintos, e ela disse isso. O Jardineiro pareceu surpreso por um momento, mas depois suas feições encarquilhadas se desanuviaram.

— Ah! Aposto que estava olhando-os no *espaço*. Claro que lhe parecem indistintos no *espaço*. Você deve olhá-los na *energia*, menina. É ali que lhe parecerão distintos.

— Como posso fazer isso? perguntou Dorothy. — Sempre olho para a posição das coisas. É a única maneira pela qual meus olhos *podem* ver. Como seria possível para mim ver energia?

— Uns olhos muito ruinzinhos, esses seus. Talvez, embora seja tão jovem, precise de um par de óculos. Aqui está, eu lhe empresto os meus.

Dorothy pegou os óculos que ele oferecia e os pôs no rosto. Eram óculos pequenos de leitura e ela desconfiou fortemente de que não favoreciam em nada a sua aparência. Mas eles de fato mudaram a maneira como via as coisas. No lugar em que o Jardineiro havia plantado seus núcleos, viu uma espécie de funil fundo, que ficava mais delgado num ponto e se espalhava ao se erguer, como a boca de uma trombeta. Pôde ver formas semelhantes mais adiante, e nelas discerniu uns contornos vagos que tomou por elétrons. Comentou isso, e o Leão, que se mantivera calado por um tempo notavelmente longo, apressou-se em esclarecê-la. Como sempre, sua voz estrondeou confiantemente.

— Esse é o poço de potencial criado pela carga elétrica positiva no núcleo. Os elétrons com carga negativa são atraídos para o núcleo e sua energia potencial é menor quanto mais perto estão da carga nuclear. Você viu como a gravidade dá aos objetos que estão muito acima do chão uma *energia potencial* que eles podem converter em energia cinética à medida que vão caindo, cada vez mais depressa. A carga elétrica do núcleo vai atrair os elétrons do mesmo modo como a massa da Terra a atrairia se você fosse imprudente o bastante para cair dentro de um poço, e você ganharia velocidade e energia cinética até atingir a água no fundo. De fato, quando os elétrons se aproximam do núcleo, é como se caíssem num poço, e isso é conhecido como poço de *potencial*. Esse poço captura elétrons e os mantém em torno do núcleo, como você vê.

— Por que eles simplesmente não caem direto até o fundo desse poço? Dorothy perguntou, sensatamente.

— São *leves* demais para ir adiante. Quando caem, os elétrons se aproximam do núcleo, e se ficarem nitidamente perto do núcleo, isso significa que suas *posições* se tornam mais bem definidas. Por causa da relação de Heisenberg, isso significa que a dispersão do momento do elétron torna-se maior. Como não se pode ter um momento *disperso* sem ter momento, os elétrons devem ganhar mais momento. O momento que ganham vem da energia cinética que obtêm ao cair poço abaixo, mas esta não existe em quantidade suficiente para permitir que sejam comprimidos demais, e eles acabam sendo capturados na forma da nuvem de elétrons que você está vendo. Não têm energia bastante para ficar ainda menores, mas o campo elétrico faz com que não se dispersem mais. Os átomos têm o tamanho que têm porque este tamanho vem a ser a extensão em que a atração elétrica fornecida pelo núcleo é capaz de comprimir a nuvem de elétrons.

Enquanto o Leão falava, o Jardineiro havia começado a despejar elétrons sobre os novos núcleos. Um deles caiu no poço de potencial que Dorothy estava observando e tomou seu lugar no nível mais baixo de energia. Um segundo elétron se seguiu, e também terminou nesse mesmo nível.

— Isto é estranho, comentou Dorothy. — Na verdade, tudo aqui é estranho, mas fui particularmente informada de que apenas um elétron pode se encaixar num estado. Agora vejo dois que foram parar no *mesmo* nível. Como pode ser?

— Ah, isso é por causa do spin, minha cara. Elétrons podem ter spins em duas direções diferentes, e portanto você pode pôr dois deles num só nível. Como minha velha avozinha querida sempre diz,

Dois elétrons se encaixam num só nível, sim
Tudo no fundo depende do seu spin.

E não há dúvida de que isso sempre acontece.

Dorothy lançou um olhar de súplica para o Leão, que se apressou em salvá-la.

— Deixe-me dizer algumas palavras sobre o spin do elétron. Eu poderia dizer muito mais do que apenas algumas, é claro, acrescentou, apresentando um livro que parecia ter estado escondido em um dos canteiros do jardim. Era intitulado *Os elétrons têm spin?*, escrito por Ivo C. Leão. — Suponho, no entanto, que algumas palavras são tudo de que se precisa no momento.— Pesarosamente, descartou o livro mais uma vez. — Os elétrons e todos os férmions têm spin; comportam-se de modo muito parecido com pequenos piões que giram incessantemente. Não podem parar de girar, e todos os elétrons têm o mesmo spin — o mesmo *momento angular*. Esse momento angular lembra um pouco o momento que você já encontrou, exceto porque aquele momento acompanhava o movimento numa linha, ao passo que este momento tem a ver com rotação. Num estado quântico, o momento angular só pode mudar por uma quantidade

igual a $\hbar$, que é geralmente chamada *uma unidade* de momento angular. O elétron pode assumir somente um de dois valores, + $\frac{1}{2}\hbar$ e - $\frac{1}{2}\hbar$. Isso costuma ser referido como "spin para cima" e "spin para baixo". Esses dois valores de spin correspondem estritamente a diferentes estados quânticos, de modo que você pode ter duas vezes mais elétrons do que o Princípio de Pauli teria sugerido em outras condições. É realmente muito simples — acrescentou, de maneira pouco convincente.

Nesse instante Dorothy viu mais um elétron cair no átomo que estava observando. Ele caiu no poço como os outros, mas parou num nível muito mais alto.

— Ele tem de ir para um nível mais alto. Não há mais lugar para ele no que fica abaixo. Como diz minha querida e velha vovozinha,

Quando um nível está saturado,
Só resta subir, está determinado.

Não faltam níveis mais acima para onde podem ir.

Outro elétron caiu e se instalou no mesmo nível. Dorothy supôs que isso se dera por causa dos estados spin de que acabara de ouvir falar, pois havia sido informada de que dois elétrons se encaixariam em cada nível. Mais um elétron caiu, e, com base no que havia visto até então, esperou que este fosse para um nível perceptivelmente mais alto. Em vez disso, ele caiu até o que parecia ser o mesmo nível de energia dos dois anteriores.

— Que é isto? exclamou. — Primeiro você disse que somente um elétron podia entrar num estado. Depois disse que podiam ser dois, por causa dos spins diferentes.

— É a pura verdade, atalhou o Leão rapidamente. — O elétron tem dois estados de spin diferentes. Estes têm a mesma energia no campo elétrico do núcleo, assim você tem dois elétrons no mesmo nível de energia. Não há engano algum, concluiu, confiantemente.

— Talvez não, Dorothy admitiu, mas *agora* há um terceiro elétron no mesmo nível. Que tem a dizer sobre isso?

Como talvez não fosse de surpreender, o Leão tinha *mesmo* alguma coisa a dizer. — Isso é diferente. Bem, na verdade é algo semelhante de certo modo, mas ainda assim é diferente. Além de girar em torno de si mesmos como pequenos piões, os elétrons podem também rotar em torno do núcleo, mais ou menos como os planetas orbitam em torno do Sol.

— Se os elétrons são atraídos pelo núcleo como os planetas pelo Sol, não estão todos em órbitas em torno do núcleo?

— Não, não é assim de maneira alguma. Os planetas não caem sobre o Sol por causa da força centrífuga causada por sua rotação. — O Leão fez uma breve pausa e estava obviamente pensando em sacar um livro que escrevera sobre a mecânica do sistema solar, mas pensou melhor e continuou. — Os elétrons não caem sobre o núcleo porque, como você viu, iria ser preciso mais energia para localizá-los perto do núcleo do que podem obter do potencial elétrico quando caem. Alguns elétrons têm uma rotação em torno do núcleo, mas outros, entre os quais os de estados de energia mais baixa, não têm.

— Para os que têm, a rotação vai dar momento angular, e isso dá mais estados. Há de fato três para a quantidade mais baixa de momento angular. Cada um desses estados de "momento orbital angular" pode ter dois estados de spin de elétron, é claro, fazendo seis ao todo. Todos têm uma energia quase igual, de modo que se você somar a isso os dois estados que obtém para elétrons que *não* têm movimento orbital, isso dá oito ao todo. Fica um pouquinho complicado, ele finalmente admitiu. — Talvez seja melhor que você simplesmente aceite que há um número de níveis de energia possíveis disponíveis, cada um dos quais pode conter apenas certo número conhecido de elétrons.

— À medida que cada elétron é acrescentado ao átomo, ele cancela ou controla uma unidade da carga positiva do núcleo, e todo elétron que chegue verá uma carga atrativa global menor. Quando o número de elétrons no átomo é igual à carga no núcleo, você tem um *átomo neutro* que não ganha mais elétrons com facilidade.

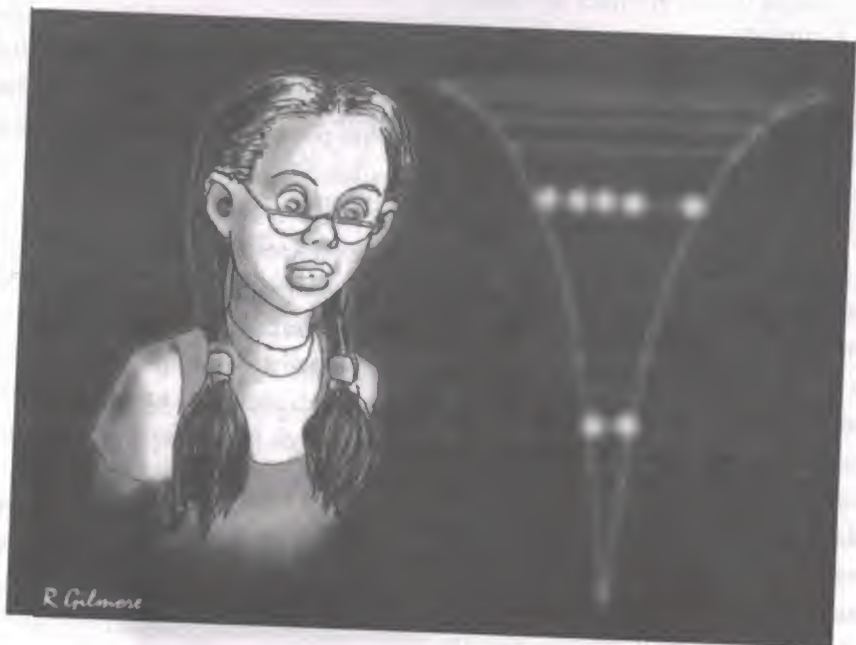
Enquanto Dorothy olhava, o átomo capturou mais elétrons do esguicho do Jardineiro, até haver cinco no nível mais alto. A cada elétron capturado, o poço potencial se encolhia, até que finalmente havia poucos indícios dele a não ser pela vizinhança imediata dos elétrons capturados. Dali em diante, qualquer elétron adicional simplesmente passava ao largo dele, sem parar.

Como parecia improvável que algo mais acontecesse com o átomo que estivera observando, a menina deu uma olhada no jardim por cima de seus "óculos de energia". Notou objetos brilhantes coruscando rapidamente por todos os lados e se lançando de átomo em átomo, como abelhas hiperativas, ela pensou. Com freqüência apenas se desviavam e seguiam seu caminho, mas vez por outra um deles colidia com um átomo e desaparecia. Uma forma brilhante relampejou diante dela e colidiu exatamente com o átomo que estivera examinando. Rapidamente, Dorothy olhou para baixo através das lentes dos seus óculos e, mais uma vez, viu os níveis de energia. Agora notou que só havia um elétron no nível mais baixo, não dois como houvera antes. Como que para compensar, havia um elétron no nível mais elevado, em que antes não houvera nenhum.

— Ali você vê que um fóton deu sua energia a um elétron e o excitou, elevando-o a um nível de energia mais alto. Isso é algo que vi freqüentemente quando estava em minha plantação, comentou o Espantalho, que se pusera logo atrás dela. — Como mencionei antes, o fóton é um bóson, e os bósons não são necessariamente *conservados*. Diferentemente de um férmion, um bóson pode simplesmente deixar de existir e abandonar toda a sua energia para um elétron no átomo. Isso eleva o elétron de seu nível inicial de energia para um mais alto, como você viu acontecer aqui. Conseqüentemente, ele deixa um *buraco*, um elétron a menos do que o nível mais baixo é capaz de conter.

Enquanto o Espantalho falava, Dorothy viu o elétron no nível mais alto sumir e notou que um outro elétron apareceu no nível exterior não preenchido. Pelo que pôde ver, os dois eventos aconteceram ao mesmo tempo, e, também ao mesmo tempo, ela viu um breve lampejo quando um fóton brilhante partiu em grande velocidade. Logo depois disso, viu uma série similar de eventos se repetir, mas dessa vez terminando com o nível mais baixo cheio e somente cinco elétrons no nível exterior, de modo que o átomo parecia com o que fora antes do impacto do fóton inicial.

— O elétron caiu de novo no buraco até o nível mais baixo, e a energia que perdeu nesse processo foi levada embora por fótons. Os fótons são muito bons para arrancar energia, pois podem ser criados facilmente, desde que haja carga elétrica envolvida, e os elétrons são bem-dotados de carga. Os elétrons — e qual-



quer outra coisa, na verdade — tendem sempre a cair para níveis de energia inferiores, se não houver nada para detê-los. Você mesma tenderia a cair no nível de energia mais baixo se houvesse um buraco *debaixo* de você. Em geral os elétrons nos níveis exteriores não podem cair porque os elétrons presentes no nível inferior preenchido ficam no seu caminho e os bloqueiam. Normalmente você não cai porque o chão sob seus pés se interpõe no seu caminho e a bloqueia. Na verdade, são os elétrons no chão que estão bloqueando os elétrons em seus pés. Os elétrons em um átomo excitado podem cair em vários estágios, mas o átomo acaba finalmente por retornar à sua energia mais baixa, no que é chamado seu *estado fundamental*. Passei tanto tempo pendurado num poste observando o solo que sou uma espécie de autoridade em estados fundamentais, acrescentou o Espantalho.

Ouvir a palavra *autoridade* aplicada a outra pessoa foi demais para o Leão que, imediatamente, se apressou a entrar na conversa. — Os fótons que podem ser emitidos dão o espectro atômico para a luz emitida por aquele tipo de átomo. Esse espectro é um conjunto único de freqüências que correspondem às energias que foram dadas aos fótons pelos elétrons que saltaram entre os níveis de energia particulares do átomo. Esse conjunto de freqüências apareceria como uma série de linhas coloridas se a luz fosse passada através de um espectrômetro, e esse conjunto de linhas identifica o átomo com tanta segurança quanto as linhas de sua impressão digital a identificam. Expliquei tudo isto aqui. Podemos ver as seções relevantes mais tarde, acrescentou, erguendo uma pedra e tirando de baixo dela um livro intitulado *Átomos de dedos leves?*, de Ivo C. Leão.

Espectros atômicos

Os elétrons num átomo estão localizados em níveis distintos, que têm energias específicas típicas daquele átomo. Quando um elétron muda de um nível de energia mais alto para um nível inferior, emite fótons que removem o excesso de energia. A energia do fóton é simplesmente a diferença entre as energias dos estados inicial e final do elétron, e esta lhe confere uma freqüência específica e característica. A luz emitida pelos átomos de qualquer tipo é feita desses fótons, e ela identifica o átomo de maneira única.

— Embora os espectros possam lhe dizer muita coisa, o mais interessante a respeito dos átomos, é, obviamente, que tudo em seu mundo é feito deles. O número de elétrons que há no nível exterior, ou de *valência*, de um átomo determina suas propriedades químicas, estrondeou o Leão, pondo de lado o livro ao agarrar avidamente a oportunidade de passar para um novo tópico.

— Como diz minha querida vovozinha, atalhou o Jardineiro,

Quando um átomo contém tudo aquilo de que é capaz
Seu lugar na Tabela Periódica de Mendeleev se faz.

Dorothy e seus companheiros olharam todos para ele.

— Bem, ela não diz isso com *muita freqüência*, admitiu.

— No entanto, é a pura verdade, reconheceu o Leão, usando esse dístico como um pretexto para exibir ainda mais os seus conhecimentos. — Os átomos são os menores pedacinhos em que os *elementos químicos* podem ser divididos, e tudo no mundo que a cerca é feito de átomos que se combinaram em *moléculas*. As moléculas são as menores porções dos vários *compostos químicos* de que são feitas todas as coisas no mundo em que você vive, inclusive você mesma.

— E você também, certamente, não é? disse Dorothy, não vendo por que razão ela deveria ser escolhida como um exemplo de composto químico.

— Bem, na realidade não. Eu sou um construto alegórico, entende, e portanto puramente fictício. Você é a mesma coisa quando está aqui. Neste momento você é pequena demais em relação aos átomos aqui, mas quando estiver de novo em sua casa seu corpo será feito de números enormes deles.

— Seja como for, ele continuou, retornando abruptamente à sua ocupação favorita de explicar as coisas, o modo como qualquer átomo se combina com outros depende do número de elétrons em sua casca exterior, que os químicos chamam de nível de energia mais elevado que contêm algum elétron. Sua atividade química depende do quanto esse nível exterior está próximo de estar *cheio*, isto é, de conter tantos elétrons quanto pode.

— Você certamente notou, ele continuou, que há uma enorme diferença na energia dos diferentes níveis. Quando o último elétron a ser acrescentado é forçado dentro de um novo nível, sua energia será um bocado maior do que a de seus companheiros em seus níveis mais baixos. Se houvesse um outro átomo próximo, e tivesse restado uma lacuna no nível exterior *desse* átomo, a energia total poderia ser reduzida se o elétron solitário se desviasse para o segundo átomo. Sei o que você vai dizer agora. — O Leão ergueu uma enorme pata para silenciar um protesto que ninguém parecia inclinado a fazer.

— Você vai contestar, dizendo que o outro átomo já terá seu pleno complemento de elétrons — que, em conseqüência, será eletricamente neutro e portanto não atrairá mais nenhum elétron. — Dorothy não viu ninguém discutindo, a não ser o próprio Leão, mas ele parecia perfeitamente capaz de representar ambos os lados de uma conversa. — Esse seria realmente o caso para elétrons muito distantes, mas qualquer elétron que estivesse próximo — que estivesse realmente no nível exterior preenchido — não seria controlado pela carga nuclear. Estaria exatamente na mesma situação que os outros elétrons naquele nível exterior. Numa situação como essa, o átomo tem mais elétrons que o necessário para equilibrar a carga positiva em seu núcleo e é conhecido como um *íon*. O elétron adicional não está preso com muita firmeza, mas, enquanto está lá, o íon tem uma carga total negativa porque tem um elétron a mais do que necessita para equilibrar a carga positiva em seu núcleo. É um íon negativo. Correspondentemente, o átomo que largou o elétron com o objetivo de esvaziar seu nível exterior é positivamente carregado. É um íon positivo.

— Como têm a mesma carga elétrica total, os íons de um dado tipo se repelem mutuamente e tendem a fugir uns dos outros. Poderíamos dizer que são *íons covardes*. — O Leão deu uma risadinha apreciativa. No entanto, como ninguém mais riu, ele continuou rapidamente: — Um íon positivo e um negativo têm cargas elétricas opostas e por isso se atraem mutuamente. Essa atração produz uma *ligação iônica* e resulta na combinação dos dois átomos para formar uma molécula. Moléculas desse tipo são coisas muito simples. O sal é um bom exemplo. Uma molécula de sal é simplesmente um íon de sódio positivo combinado com um íon negativo de cloro. Contém apenas dois átomos, mais nada.

— Moléculas mais complicadas podem resultar de *ligações covalentes*, em que elétrons são *partilhados* entre átomos. Isso é especialmente notável no caso do carbono.

. . . .

Química e a Tabela Periódica

O número de elétrons de valência em seu nível de energia mais exterior determina o comportamento químico de um átomo. Pode haver um elétron faltando para preencher um nível num átomo e, em outro, um elétron isolado num nível mais alto. Haverá liberação de energia se o elétron desacompanhado se transferir para o espaço sobrando no outro átomo, e a força elétrica resultante liga os dois átomos entre si para dar uma molécula, a menor parte de um *composto* químico.

. . . .

Nesse ponto, a fala mansa e quase hipnótica do Leão foi subitamente interrompida por uma cantilena cadenciada:

Salve grande Carbono, abençoadas sejam tuas ligações
Louvado seja o de quatro valências, o construtor da vida.

Os quatro companheiros viraram-se bruscamente para constatar que um grupo de pessoas se aproximara enquanto o Leão estava falando. Vestiam batas compridas e simples e tinham considerável quantidade de pêlos nas faces, o que



se combinava com expressões de tão ardente sinceridade que pareciam quase simplórios. Um dos membros do grupo, que parecia ser seu líder, ou pelo menos seu porta-voz, dirigiu-se a Dorothy e seus amigos.

— Somos membros da Comuna do Carbono. Devotamo-nos à missão de moldar moléculas de todas as múltiplas variedades que podem ser construídas tendo o maravilhoso átomo de carbono como sua base. Todo o nosso trabalho é completamente orgânico, é claro.[2] O carbono é um átomo em equilíbrio perfeito. Tem elétrons de quatro valências em seu nível de energia mais elevado, ou exterior, como o chamamos. Para ficar completo, necessitaria de oito. Assim, vocês vêem que ele ao mesmo tempo *carece* de quatro elétrons e tem quatro *em excesso.* Deveria ganhar quatro elétrons de outros átomos ou perder os quatro que tem? Ambos os métodos serviriam igualmente bem para dar um nível completo, e ambos são possíveis. Como ambos são possíveis, ambos são compulsórios, e o carbono usa *os dois.* O carbono cortesmente *partilha* seus quatro elétrons com quatro em outros átomos de modo que, nessa condição, combina

2. Os elementos químicos que contêm carbono são conhecidos como compostos orgânicos. Os que não contêm são chamados inorgânicos. Essa nomenclatura surgiu porque a vida na Terra é baseada numa assombrosa variedade de compostos que podem ser feitos de carbono.

uma amplitude que tem oito elétrons em sua casca exterior com uma amplitude que não tem nenhum. Ambas as escolhas produzem uma casca exterior completa para o carbono, porque não ter nenhum elétron na "casca exterior" antiga significa que agora o nível completo imediatamente inferior passa a ser o exterior. Seja como for, essa partilha significa que os átomos são atraídos uns pelos outros[3] e assim o efeito global dessa "interação de troca" ou "ligação covalente" é atrativa. Venham conosco e vejam que tipo de moléculas fazemos.

O bando dos membros da comuna saiu marchando ruidosamente com seus pés calçados em sandálias e avançaram através do jardim até a Estrada dos Tijolos. Nesse ponto, a maioria dos blocos da estrada exibia o símbolo C ou H, com um O ou um N ocasionais. Haviam percorrido apenas um curto trecho da estrada quando chegaram a uma grande construção que lembrava um celeiro. Foram introduzidos num salão de pé-direito alto onde muitos outros membros da comuna, igualmente vestidos com batas, estavam trabalhando na montagem de estruturas complexas. À primeira vista, essas estruturas pareciam feitas de pequenas bolas conectadas por hastes curtas, mas, a um exame mais atento, as bolas tinham a aparência bastante indefinida dos átomos que Dorothy já vira, e eram conectadas por borrões nebulosos que as grudavam umas às outras nos pontos em que se tocavam. A primeira pessoa de quem se aproximaram era jovem, um adolescente sem barba nem bigode. Ele estava montando uma estrutura de aspecto rudimentar que nada mais era que um único átomo de carbono central com quatro átomos de hidrogênio distribuídos em torno dele.

— Este é Billy. Acaba de ingressar na comuna, e assim nós o estamos iniciando com a molécula orgânica mais simples, o metano. Essa molécula mostra claramente que o carbono pode ter quatro ligações, uma para cada um dos quatro átomos de hidrogênio que o cercam. Como vêem, os quatro elétrons na casca exterior do carbono estão partilhando os elétrons únicos de cada um dos quatro átomos de hidrogênio.

Foram adiante. O item seguinte em construção era um pouquinho mais complicado, com dois átomos de carbono ligados um ao outro, estando o par envolvido por seis átomos de hidrogênio. Cinco estavam diretamente conectados com o carbono, mas um tinha um novo tipo de átomo entre ele e o carbono.

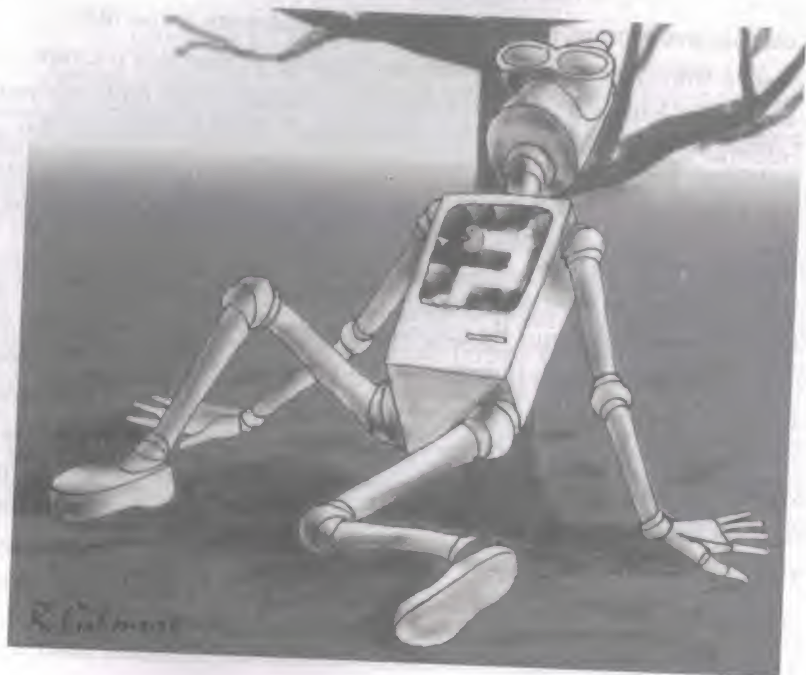
— O átomo extra é de oxigênio. As moléculas orgânicas muitas vezes contêm oxigênio assim como carbono e hidrogênio. As moléculas maiores também contêm todo tipo de outros átomos. É mais fácil compreender a natureza de uma molécula orgânica vendo um diagrama que mostra como os átomos estão

3. Isso não é de modo algum evidente, mas é assim que funciona.

arranjados. — A tela no peito do Sabichão de Lata acendeu, e ele mostrou uma pequena imagem da molécula que Dorothy acabara de ver, com os tipos de átomos mostrados em cores diferentes.

Enquanto Dorothy acompanhava seu guia pela oficina da comuna, seu companheiro eletrônico mostrou uma série de moléculas cuja complexidade crescia regularmente. Ou melhor, Dorothy pensou com seus botões que as moléculas que lhe mostravam eram constantemente mais complexas, e o Sabichão de Lata lhe mostrou um diagrama de cada uma; entre um e outro, porém, ela notou que ele exibiu repetidas vezes a molécula com que tinha começado. Eles haviam chegado a uma seção do prédio em que vários grupos de membros da comuna estavam trabalhando juntos numa vasta molécula, uma construção que parecia uma enorme hélice dupla e ia se estendendo em direção às sombras indistintas na extremidade mais afastada do prédio. Nesse ponto, as juntas articuladas do joelho do Sabichão de Lata subitamente entraram em colapso, e ele desabou no chão com um estrondo.

— Não she preocupe, disse ele, fiquei um pouquinho inshtável, só isso. Vou entrar agora meshmo no modo de relaxamento por unsh doish minutosh e ficarei o.k. — Em sua tela, naquele momento cheia dos átomos que compunham a última molécula que estivera mostrando, apareceu uma pequena forma redonda que era essencialmente uma grande e esfomeada boca. Esta se movia



aleatoriamente através da figura apinhada, devorando a imagem e deixando um rastro vazio atrás de si.

— Que aconteceu com ele? exclamou Dorothy com certa consternação. — Isso não é do seu feitio.

— Temo que nosso amigo tenha andado tomando uns golinhos a mais, disse o Espantalho. — Não sei se você notou as moléculas que ficaram aparecendo em seu monitor: eram álcool etílico. Temo que nosso companheiro cibernético esteja ciberbêbado.

— Como isso é possível? perguntou a menina. — Tudo que ele fez foi mostrar figuras das moléculas. *Isso* certamente não poderia deixar uma pessoa bêbada!

— Não uma pessoa, talvez, murmurou o Espantalho, mas você tem de admitir que ele não é exatamente um tipo *comum* de pessoa. É realmente mais um computador, e é alimentado mais por programas do que por comida. Sendo assim, a *fórmula* do álcool é mais do que suficiente para deixá-lo um pouquinho alto. O melhor que faríamos seria levá-lo embora daqui.

Juntos, Dorothy e o Espantalho puseram seu amigo sobre as costas do Leão e refizeram seus passos ao longo da Estrada dos Tijolos rumo ao jardim. Apesar do esforço para impedir que o Sabichão de Lata caísse de cima do Leão num emaranhamento descoordenado de metal, Dorothy teve tempo de perceber que muitos dos blocos com seus diferentes símbolo haviam se fundido em ajuntamentos grandes, complexos. Ao longo de toda a jornada, o Sabichão de Lata ficou emitindo uma espécie de apito eletrônico maníaco e acenando os braços para todos os lados. Quando se afastaram da influência dos compostos de carbono e entraram de novo no jardim, ele se acalmou e logo foi capaz de ficar de pé, ainda que meio bambo.

— Tantas substâncias, e todas dependem da presença de um tipo específico de átomo. Parece realmente notável, comentou Dorothy, que sentia que não era correto fazer mais comentários sobre o comportamento de seu companheiro. — Se os átomos são tão diferentes, o que decide essa diferença?

— Ora, é o número de elétrons na casca exterior, nada mais. O número de elétrons no átomo determina seu comportamento químico.

— Então por que alguns átomos *têm* mais elétrons do que outros?

— Ora, é tudo por causa da carga em seus núcleos, minha



cara. — O jardineiro havia se juntado a eles quando entraram de novo no jardim, mas havia mantido silêncio até aquele instante. — Um átomo tem exatamente os elétrons de que precisa para se emparelhar com seu núcleo. É como liz minha querida vovozinha,

Todos os elétrons de que um átomo pode precisar
São aqueles que venham com seu núcleo se emparelhar.

A resposta, minha menina, reside no núcleo.

6 A Semente no Coração do Mundo

— Então o que é esse núcleo e onde ele está? perguntou Dorothy.

— Ora, cá está ele, no coração do átomo, respondeu o jardineiro, apanhando um átomo que estava por perto e que por acaso era um carbono. Segurou-o para que Dorothy o examinasse. Ela olhou atentamente o objeto difuso, mas não conseguiu ver nada de diferente no centro.

— Não o vejo, disse.

— Bem, certamente é muito pequeno, respondeu o Jardineiro. — Veja, deixe-me fazê-lo crescer um bocado. — A forma borrada do átomo começou a se expandir. Foi crescendo, crescendo de maneira absurda até que se espalhou tanto de cada lado que chegou a ter as dimensões totais de um estádio de futebol.

— Como fez isso? disse Dorothy num arquejo. O Jardineiro sorriu.

— Que belo jardineiro eu seria se não soubesse fazer as coisas crescerem! Agora olhe e veja se consegue pelo menos avistar o núcleo ali no meio.

Dorothy olhou. Viu a nuvem indistinta da distribuição de probabilidade dos elétrons se espalhando muito para todos os lados. Procurou em vão na região brumosa diante de si, mas não conseguiu ver nada em toda a grande extensão amorfa das amplitudes dos elétrons. Disse isso ao Jardineiro.

— Ora, é assim mesmo. Embora não consiga vê-lo, ele está lá com toda certeza. Mas o núcleo pode continuar pequeno e é difícil ver onde está. Normalmente ele fica perdido em meio a toda essa nuvem de elétrons. É o que minha vovozinha costuma dizer:

Por mais que você queira examinar e esperar
Não consegue ver o núcleo que os elétrons vêm tapar

Se quisermos encontrá-lo, vamos precisar de uma pequena ajuda. Por sorte o grupo local de exploradores alfa está fazendo sua "tarefa MeV"[1] esta semana, e um bando dos pequenos vira-latas acaba de chegar.

1. Um MeV (pronuncia-se "mév") é uma medida da energia que uma partícula possui. Quando Ernest Rutherford realizou os experimentos de espalhamento que revelaram a existência do núcleo, usou partículas alfa com energias de alguns MeV.

Dorothy olhou atrás do Jardineiro enquanto ele falava e pôde ver uma multidão de pequenas formas, ou pelo menos teve certa impressão de vê-la. Lançavam-se em todas as direções, com grande velocidade, e emitiam ruídos estridentes, excitados. Sob o olhar fascinado da menina, o Jardineiro se dedicou pacientemente ao trabalho de pastorear esse bando de enérgicos auxiliares e encaminhá-los através da grande extensão do átomo. As alfas seguiram desabaladas, deliciando-se, tomando caminhos aleatórios pela região. A maioria correu diretamente de um lado para outro sem desvio aparente. Algumas davam guinadas em torno do ponto mediano de sua trajetória e saíam correndo numa direção ligeiramente diferente daquela em que tinham vindo. A maior parte era defletida apenas ligeiramente, e Dorothy a princípio não notou o desvio, mas depois uma delas deu uma guinada em tal ângulo que não pôde escapar à sua atenção.

— Por que algumas delas se desviam para o lado enquanto se movimentam? ela perguntou a ninguém em particular. Não a surpreendeu nada que o Leão decidisse responder.

— É por causa da sua carga: sua carga elétrica. As partículas alfa têm carga elétrica positiva, assim como o núcleo. Em conseqüência, repelem-se mutuamente; as alfas são empurradas para longe do núcleo e se desviam. Quanto mais perto chegam da carga no núcleo, mais forte é essa repulsão e mais elas são defletidas. Algumas chegam realmente muito perto. Olhe só aquela ali.

Dorothy viu então que entre as várias alfas que corriam de um lado para outro com muito pouca ou talvez nenhuma mudança de direção, havia uma que de repente parou e ricocheteou quase diretamente fazendo seu caminho de volta.

— Quando você considera quanta energia essas alfas têm, pode ter uma idéia de que é necessária uma força muito poderosa para fazê-las virar ao contrário como esta. As forças elétricas ficam mais fortes quanto mais perto as cargas que interagem estão uma da outra. Para obter uma força grande o suficiente, a alfa deve passar *muito* perto da carga nuclear. Isso mostra que o núcleo deve ser realmente muito pequeno.

— Desculpe-me, Dorothy recomeçou. — Não vejo como mostra isso em absoluto.

— Oh, mas mostra, interrompeu o Espantalho. — Por exemplo, pense só no quanto seria difícil para você chegar a uns poucos centímetros da Terra inteira.

— Isso não tem nada de difícil! a menina replicou. Estava começando a ficar bastante cansada do que lhe pareciam ser analogias inadequadas. — Estou a alguns centímetros da Terra o tempo todo.

— Não, não, objetou o Espantalho. — Não estou falando de terra como a que você tem no chão. Refiro-me à Terra, ao planeta. Sei tudo sobre a terra, ele

acrescentou. — Estive contemplando-a durante anos. Você pode ser capaz de chegar perto da *superfície* da Terra, mas não pode chegar perto de *toda* ela. Pode ficar perto do pedacinho da Terra que é o Kansas, mas estará a grande distância da Austrália. Não pode chegar muito perto da Terra porque a própria Terra é grande e espalhada demais. Você estará sempre a uma longa distância da maior parte dela. Só lhe seria possível chegar perto da Terra inteira se ela fosse pequena e cada pedacinho dela fosse próximo dos demais. Para obter o tipo de força de que precisam para virar ao contrário, as partículas alfa precisam chegar perto de *toda* a carga nuclear, e isso só pode acontecer se o próprio núcleo for muito pequeno. Se tentarmos encontrar o lugar do qual as alfas estavam fugindo, poderemos encontrar o núcleo. Vamos ver se conseguimos.

Caminharam até o ponto que era, pelo que podiam julgar, o lugar que todas as alfas estavam evitando. Procuraram em volta diligentemente e, de repente, Dorothy o viu. Flutuando no nevoeiro da amplitude dos elétrons, viu um objeto denso e minúsculo, mais ou menos do tamanho de um grão de arroz.

— É isto aqui? exclamou incrédula, estendendo a mão para apanhá-lo e examiná-lo mais de perto. Para sua surpresa, ele não se mexia. Por menor e mais insignificante que aquilo parecesse, ela era tão incapaz de movê-lo como se fosse a cabeça de um prego fincado em granito sólido. — Por que ele não quer se mover? ela exclamou, frustrada. Tinha sido mais um protesto involuntário do que uma pergunta, mas foi o bastante para estimular uma resposta do Leão

— Não vai se mover com facilidade porque é pesado demais. O núcleo, embora tão pequeno, contém mais de 99,9% da massa de um átomo. É como se a massa de um grande edifício estivesse concentrada num tijolo. Não seria nada fácil assentar esse tijolo.

— Ainda não consigo acreditar que algo tão pequeno possa ser tão pesado. Qualquer coisa assim tão pesada é forçosamente grande, na minha experiência. É uma simples questão de senso comum.

— Esse é o problema, é claro, retrucou o Leão com um ligeiro suspiro. — Sua experiência não abrange uma escala tão pequena. Seu senso comum é excelente em situações comuns, situações de que você já teve experiência, mas não serve de guia para o desconhecido. *Aqui* os pequenos objetos é que serão pesados, porque somente objetos pesados podem ser pequenos. Se algo tem uma massa grande, poderá ter um grande momento sem movimento demais e assim poderá ser bem localizado e pequeno. Coisas leves não têm escolha senão ser grandes, justamente por serem tão espalhadas. Você espera que coisas grandes sejam pesadas porque todos os objetos que normalmente experimenta formam na verdade coleções de *grandes* números de *pequenos* objetos, a saber, átomos. Naturalmente, quanto mais objetos você tem, mais pesados eles são, mas você

não tem nenhuma experiência do peso relativo de coisas grandes e pequenas no nível da partícula individual.

— Talvez seja isso mesmo, disse Dorothy com relutância, não querendo abandonar de imediato sua compreensão intuitiva das coisas. Empurrou com raiva a pequena forma do núcleo. — Olhe! exclamou. — Acho que está se movendo um pouquinho.

— Com licença, senhora — disse uma nova voz logo atrás de Dorothy. Ela olhou à sua volta e viu um homem grande, muito bem vestido. Tinha traços regulares, ainda que inexpressivos, cabelo curto e um longo paletó branco com uma fileira de canetas e lápis no bolso do peito. Passou por ela e apanhou habilidosamente o núcleo.

— Como conseguiu? perguntou Dorothy com uma voz marcada pela surpresa e por certo ressentimento por vê-lo ser capaz de fazer, com tão pouco esforço aparente, aquilo de que não fora capaz.

— Foi para fazer isso que me formei, senhora. Sou um Inspetor de Pesos e Medidas Nucleares e meu trabalho é conferir os parâmetros de amostras de núcleos — seus tamanhos, massas e outras propriedades similares. Disse isso num tom desprovido de emoção, como se estivesse lendo um manual invisível. Em seguida tirou de um bolso interno um pequeno estojo de plástico, como esses



que costumam conter um conjunto de pequeninas chaves de fenda. Quando a abriu, Dorothy só conseguiu reconhecer o item maior no conjunto como uma minúscula régua de metal. O conteúdo do estojo estava arranjado em ordem decrescente e ele pegou um dos menores objetos. Em seguida inseriu um ocular de joalheiro num olho, apertou o outro, e mediu o tamanho do núcleo.

— Hum, ligeiramente abaixo de cinco fermis.[2] Bem, isto está aproximadamente correto para este núcleo, desde que este seja o átomo que penso que é. É melhor me certificar. — Abriu uma sacola de lona que carregava e tirou dela uma caixa quadrada de metal com várias janelinhas espalhadas por ela. Ligou um interruptor na lateral da caixa. A mistura total de amplitudes de elétrons que os envolvia condensou-se brevemente em seis blocos dispostos aleatoriamente em torno da área ocupada pelo átomo. Rapidamente se misturaram de novo até que, mais uma vez, havia à volta deles uma nuvem sem traços característicos, do tamanho de um estádio. Abruptamente, essa nuvem se contraiu novamente em seis regiões separadas, embora suas posições não apresentassem nenhuma semelhança óbvia com as seis vistas anteriormente. Como antes, as seis se amalgamaram numa distribuição uniforme que durou até que esta, por sua vez, se solidificou em seis pacotes separados. Todo o processo foi repetido várias vezes, até que o Inspetor desligou o interruptor.

— O que estava acontecendo? perguntou a menina, curiosa.

— Isto é um *estrobservoscópio*, respondeu o Inspetor num tom calmo e informativo. — Você certamente nunca viu um destes antes.[3] Pode ter visto um estroboscópio, porém. É um aparelho que lhe dá explosões de luz uma após a outra, de modo que você pode ver as coisas numa rápida sucessão de *flashes*. Este aparelho aqui é semelhante, à medida que faz uma série de observações das posições dos elétrons no átomo. Cada observação localiza os elétrons nas posições observadas, embora suas amplitudes logo se espalhem.

A exibição tinha sido interessante, mas Dorothy não entendeu realmente o que ela provava. As observações sucessivas haviam mostrado os elétrons em posições completamente diferentes, e não lhe parecia que nenhum padrão geral tivesse ficado evidente. — As diferentes observações não têm nada em comum, ela assinalou.

— Ah, mas aí a senhora se engana. As observações tiveram uma coisa em comum. Todas mostraram seis elétrons, ainda que estivessem em posições dife-

2. Um fermi é uma unidade de comprimento usada para dar o tamanho dos núcleos. É igual a 10^{-15} metro. Isto é um trilionésimo de milímetro. Os núcleos são *pequenos*.
3. Isso é porque tal coisa não existe. Se quiser fazer uma seqüência de observações, terá de fazê-la você mesmo.

rentes a cada vez. Se o *átomo* tem seis elétrons negativamente carregados, disto se segue que o núcleo deve ter seis cargas positivas para tornar o átomo neutro no total. Isso significa que ele contém seis prótons. Cada próton tem uma carga positiva, assim há seis prótons, todos comprimidos juntos, dentro deste núcleo.

— Se são todos positivos, como podem ficar tão próximos? Com certeza deveriam correr para longe uns dos outros, disse a menina um tanto confusa. — Tenho certeza de que me disseram que cargas positivas se repelem umas às outras. As negativas também, aliás, acrescentou numa reflexão posterior.

— Realmente elas o fazem, uma nova voz exclamou antes que qualquer de seus companheiros pudesse responder. Dorothy se virou para ter uma visão de EM se elevando de dentro da amplitude do elétron. — Os prótons estão tão próximos entre si que são empurrados para longe uns dos outros por forças milhões de vezes maiores do que as que operam no confins mais amplos do átomo. Veja você mesma. — Apontou um dedo comprido para o núcleo, exatamente como, mais cedo, os companheiros a tinham visto apontar para um seixo da estrada com resultados dramáticos. Abruptamente, seu movimento cessou, e eles viram que ela estava agora envolta em faixas coloridas que a apertavam tanto que não podia se mexer.

— Nem pense nisso, Irmã! disse uma outra voz que não tinham ouvido antes. — Você sabe que sua eletricidade é subjugada quando partículas sentem minhas forças de cor. O que a cor uniu, que nenhuma carga elétrica separe.

A visão de EM se desvaneceu, ainda lutando (de uma maneira digna) dentro das faixas de cor que a envolviam.

— Os prótons são grudados uns nos outros dentro do núcleo por forças nucleares fortes. Elas são completamente diferentes da eletricidade, e sua presença resulta em um produto vigoroso e esmerado, continuou o Inspetor calmamente, em resposta à observação original de Dorothy. Desviou seu olhar de novo para o núcleo. — Agora preciso verificar o que mais pode estar ali.

Jogou o núcleo na palma da sua mão e balançou-o delicadamente para cima e para baixo.

— Isto parece pesar cerca de 12 u.m.a. São unidades de massa atômica, senhora. Doze parece ser o número aproximado. Isso significa que deve haver seis nêutrons no núcleo além dos seis prótons. Os nêutrons pesam quase o mesmo que os prótons, embora não tenham nenhuma carga elétrica. Como não têm carga, não afetam o número de elétrons que o núcleo pode sustentar. Com meus estudos, posso fazer uma boa estimativa do peso de um núcleo, mas é meu dever verificá-lo mais precisamente.

Abriu de novo sua sacola de lona e tirou uma outra caixa reluzente, esta com uma pequena plataforma no topo. Pôs o núcleo sobre ela, ligou um interruptor e leu o peso num mostrador digital na lateral.[4]

— Que é isto? ele perguntou rispidamente, abandonando de repente sua atitude relaxada. — O peso é menor do que a soma dos prótons e nêutrons de que ele é composto. O que nos está sendo dado é um peso baixo. Não pode ser!

— Se me permite contradizê-lo, disse o Leão, isso *sempre* vai acontecer. A massa de qualquer núcleo composto será sempre menor do que a soma das massas dos prótons e nêutrons que o compõem. A soma é menor, não maior, do que as partes por causa da energia de ligação que mantém o núcleo coeso. Qualquer sistema ligado, como um núcleo, tem uma força de ligação negativa. Isso significa que os componentes precisam *receber* energia antes que possam se separar, e sem esse *input* de energia, são cativos. Estão *ligados*. Isso está explicado, em larga medida, em meu livro. —O Leão tirou de algum lugar nas brumas circundantes um livro chamado *Partículas presas numa ligação*, de Ivo C. Leão. Ia abrindo-o, mas parou no meio. — Mas com certeza você deve saber tudo sobre isto, disse. — Vamos explicar sobre massa e energia mais tarde, acrescentou num aparte para Dorothy.

— É claro que sei, respondeu o Inspetor, que havia recobrado a aparência calma. — Está tudo detalhado nos diagramas-padrão dos produtos. — Puxou de sua inestimável sacola de lona um longo diagrama enrolado, juntamente com um conveniente cavalete dobrável para exibi-lo. Armou o cavalete e prendeu o diagrama desdobrado sobre ele. O diagrama mostrava uma longa curva que se elevava a partir do zero do lado esquerdo, subia para um pico largo e suave no meio e depois caía gradualmente em direção ao lado direito. Dispersos ao longo da curva, havia pequeninos desenhos de núcleos de vários tipos. Pelo menos, Dorothy *pensou* que eram desenhos.

— Isto mostra a energia de ligação por núcleo para vários núcleos, disse ele, como se isso explicasse tudo.

— Com sua licença, interrompeu a menina, que *não* pensava que aquilo explicava tudo. — Acha que poderia explicar isso só um pouquinho?

---

4. As mensurações de tamanho e massa nucleares são na realidade um pouco mais indiretas que isso. O tamanho é encontrado sobretudo a partir de experimentos de espalhamento (como o espalhamento alfa mencionado no texto). A massa é determinada pesando-se grande número de átomos (isto é, matéria comum) e levando-se em conta a massa relativamente minúscula dos elétrons. Ou, de forma mais direta, para partículas individuais, com um aparelho chamado espectrógrafo de massa. Se você quiser saber como isso é feito, eu o remeto ao capítulo sobre física nuclear de seu manual de física favorito na faculdade.

— Certo, senhora. Sei que estas coisas por vezes não são muito claras para pessoas que não são do ramo. Este pequeno gráfico aqui mostra as energias de ligação para núcleos de diferentes tamanhos. Os núcleos estão arranjados da esquerda para a direita na ordem de sua carga elétrica — o número de elétrons que cada núcleo poderia manter num átomo. O núcleo mais leve, o hidrogênio, está à esquerda e o núcleo mais pesado que aparece, o urânio, está do outro lado, à direita. O diagrama mostra a energia de ligação para cada núcleon. *Núcleon* é um termo genérico que se aplica tanto a prótons quanto a nêutrons, ele acrescentou num parêntese. — Como estava dizendo, ele mostra quanta energia seria preciso acrescentar a um núcleon para removê-lo de um dado núcleo. Essa é a energia com que o núcleon está *ligado* dentro do núcleo. Você pode ver que nenhuma energia de ligação nuclear é mostrada para o hidrogênio. Como o núcleo do hidrogênio é um único próton, não há nada com que possa se ligar.

No outro extremo, continuou o Inspetor, os nêutrons e prótons nos núcleos realmente pesados não são tão fortemente ligados quanto em núcleos de tamanho médio. Isso ocorre em grande parte como efeito das forças elétricas que você mencionou antes. Quando um núcleo contém grande quantidade de prótons e cada um está empurrando *todos os demais* para longe de si, a energia de ligação é reduzida. De fato, alguns dos mais pesados não são tão sólidos e bem construídos quanto poderíamos desejar. São um pouquinho *instáveis*.

. . . .

Estabilidade nuclear

Os núcleos atômicos são compostos essencialmente de prótons e nêutrons, conhecidos coletivamente como *núcleons*. Eles são mantidos coesos por uma "força nuclear forte" de pequeno alcance. Esta produz uma espécie de cola que gruda os núcleons "onde eles se tocam". Os prótons também têm uma carga elétrica, e como todos têm o mesmo tipo de carga, repelem-se uns aos outros. Isso tende a despedaçar o núcleo, e de fato nenhum núcleo que contenha somente prótons é estável (com exceção do hidrogênio, e este é apenas um próton isolado).

A adição de nêutrons serve para manter os prótons a maior distância uns dos outros e, como os nêutrons não são idênticos aos prótons, o Princípio de Exclusão de Pauli não impede que nêutrons e prótons entrem independentemente nos mais baixos níveis de energia disponíveis. O resultado é que os núcleos mais estáveis têm números aproximadamente iguais de nêutrons e prótons. A relação de fato varia um pouco, e pode haver mais de um tipo de núcleo para o mesmo elemento químico. No entanto, todos têm o mesmo número de prótons, e portanto a mesma carga elétrica, capturando o mesmo número de elétrons. Apenas têm números ligeiramente diferentes de nêutrons. Esses núcleos são ditos *isótopos* entre si.

Nos núcleos realmente grandes há muito mais nêutrons do que prótons. A repulsão elétrica entre prótons é de longo alcance, assim *todos* os prótons num núcleo repelem todos os outros. A interação nuclear afeta somente os núcleons vizinhos, de modo que, quanto maior é o núcleo, maior é o efeito relativo da repulsão dos prótons e maior é a fração de nêutrons necessária para separá-los. O urânio-235 tem 92 prótons e 143 nêutrons, por exemplo, e mesmo assim pedacinhos desse núcleo tendem a se desprender espontaneamente (um processo chamado decaimento α). Como o urânio decai muito lentamente, ainda resta um pouco à nossa volta. Os núcleos mais instáveis decaíram todos muito tempo atrás.

. . . .

Enquanto ele falava, Dorothy notou que um dos núcleos perto da direita no gráfico moveu-se abruptamente umas duas casas para a esquerda e um pouco para cima na curva. Comentou esse comportamento, que pareceu uma coisa bastante estranha de se ver num gráfico.

— Ah, sim, por razões de economia estamos usando núcleos de verdade em vez de desenhos. Isto significa que as variedades instáveis decaem ocasionalmente. Você flagrou um no ato. Ele deve ter emitido uma partícula alfa, isto é, um par de prótons e um par de nêutrons ligados num pequeno pacote, acrescentou.

— Por que ele não joga fora simplesmente prótons ou nêutrons um por um, se isso é o que o núcleo tem dentro de si? Por que haveria de se dar ao trabalho de transformá-los em pequenos pacotes? perguntou Dorothy, de uma maneira que lhe pareceu muito sensata.

— É novamente por causa da energia, respondeu o Inspetor. — O que quer que realmente aconteça no mundo físico é em grande parte impelido por uma tentativa da natureza de liberar energia na forma de energia cinética, de modo que as coisas possam se mover por aí ainda mais.[5] Os prótons e os nêutrons na partícula alfa estão ligados com uma energia de ligação relativamente grande para um núcleo tão leve. Como estão ligados, têm menos energia do que se estivessem livres e independentes, de modo que isso libera mais energia para seu movimento. Em particular, isso significa que, se não houver energia disponível suficiente para ejetar um único núcleon, pode ser possível emitir as partículas como um grupo que tenha um déficit de energia por si mesmo. Isso demanda menos energia do que a que teria de ser devolvida a cada partícula para torná-la completamente isenta de qualquer dívida de energia. É mais ou menos como se

5. A predileção da natureza pela atividade e pela conversão de outras formas de energia em energia cinética é um assunto do campo da termodinâmica. É discutido com certa extensão na primeira seção de meu livro *Scrooge's Cryptic Carol*.

você, não podendo pagar toda a hipoteca sobre sua casa, fizesse um empréstimo menor para cobrir parte dela.

— Acho que entendo isso, respondeu Dorothy. Tinha realmente impressão de que entendera, embora fosse jovem demais para ter pensado muito sobre hipotecas. — Então de fato os núcleos não arremessam prótons ou nêutrons um por um. Eles os emitem somente em grupo, na forma de partículas alfa.

— Isso não é inteiramente verdade, por vários motivos, replicou o Inspetor com certo pedantismo. Seu trabalho como supervisor de padrões tendia a torná-lo muito meticuloso. — Núcleos com *grande* excesso de energia vão emitir prótons ou nêutrons, mas qualquer núcleo com tanta energia sobrando vai decair fácil e rapidamente. Um núcleo que tenha durado por um longo tempo, ou seja, qualquer um que você pode encontrar por aí, obviamente só decai lentamente e com dificuldade. Um núcleo como esse terá um excedente muito pequeno de energia e só pode se permitir emitir as partículas dentro de um α que ainda tem parte de sua energia hipotecada.

— Você está errada também, o Inspetor continuou calmamente, ao dizer que somente partículas α podem sair. Substâncias radioativas instáveis podem emitir radiação β e γ tanto quanto α.[6] No caso de γ, isso não é de surpreender, porque trata-se apenas de um fóton de energia bastante alta. É emitido quando estados excitados de um núcleo decaem, exatamente como um fóton de energia mais baixa é emitido quando os elétrons de um átomo mudam de um estado para outro. Um processo prévio de decaimento, como a emissão de uma partícula α, pode de fato deixar o núcleo remanescente numa condição perturbada. Esse núcleo pode então liberar energia emitindo fótons, exatamente como o faz um átomo excitado. Por causa do tamanho muito mais compacto do núcleo, as energias envolvidas são muito maiores do que as dos estados dos elétrons de um átomo, embora eu prefira dizer que o núcleo é mais compacto *porque* as energias envolvidas são maiores.

— As partículas β são simples elétrons, ele acrescentou.

— Então os elétrons estão *dentro* do núcleo, assim como em uma espécie de nuvem que o envolve? Dorothy perguntou.

— Não, claro que não. Os elétrons são leves demais para ser comprimidos num tamanho tão pequeno. Eles são o que nós do ramo chamamos *léptons.* Isso

6. Os pioneiros da física nuclear descobriram que os materiais radioativos emitiam três tipos distintos de "raios" e os chamaram, bastante sensatamente, α, β e γ (alfa, beta e gama). Eles são de fato surpreendentemente diferentes e são na realidade causados primariamente por três interações distintas: forte, fraca e eletromagnética, respectivamente.

significa entre outras coisas, que não são afetados em absoluto pelas forças fortes que comprimem os prótons e nêutrons juntos num volume tão pequeno. A força mais forte que sentem é o eletromagnetismo, e já lhe disseram que o tamanho do átomo é tão pequeno quanto as forças elétricas são capazes de comprimir os elétrons. É por isso que os átomos têm o tamanho que têm. Um núcleo é *muitíssimo* pequeno. — Parou de falar, com um ar conclusivo.

— Bem, se não há elétrons dentro de um núcleo, como podem eles sair como essas coisas β? Uma pergunta procedente, pensou Dorothy.

— Espere e verá — foi a única resposta. — Espere até encontrar o Mágico dos Quarks e a Bruxa Fraca. Então tudo, ou pelo menos alguma coisa, será revelado. — Fechou a boca com firmeza e não falaria mais nada sobre o tópico, diante do que Dorothy se sentiu compelida a mudar de assunto.

— Mas então, disse ela, se uma partícula como essa foi lançada quando o núcleo decaiu, por que não a vi?

— Porque elas são minúsculas e se movem com espantosa rapidez. Poderiam estar correndo à sua volta e você não saberia que estão ali. Se quiser saber quando estão por perto, precisará chamar o Detector.

— E quem é o Detector? perguntou Dorothy, embora sentisse, como acontecia com tanta freqüência ultimamente, que estava fadada a ouvir uma resposta, querendo ou não.

— A melhor maneira é apresentá-lo a você, respondeu o Inspetor enquanto tirava um pequeno instrumento preto de sua sacola e apertava alguns botões em sua superfície. Seguiu-se uma pausa bastante longa. Depois todos eles viram assomar à distância um vulto que vinha por uma das aléias do jardim, além dos limites do átomo magnificado que os cercava. Adiantaram-se ao seu encontro, e já estavam quase nos limites da nuvem expandida de elétrons quando ele parou junto deles. Parecia ser um sujeito bastante desmazelado, com um espesso bigode e um boné de pano encardido puxado até quase cobrir suas sobrancelhas cerradas. Empurrava um carrinho de mão empilhado até o alto com uma pilha alta de uma espantosa coleção de equipamentos inteiramente desconhecidos. Dorothy não conseguiu ver ali nada cujo propósito pudesse pelo menos imaginar.

— Bom dia! saudou-o o Inspetor. — Posso lhe apresentar Dorothy e seus amigos? Eles querem saber como se pode detectar a presença de partículas de alta energia. Este é o Detector, acrescentou de maneira bastante desnecessária, voltando-se para o grupo de companheiros. — Sua ocupação é detectar onde estão essas minúsculas par-



tículas, ou melhor, onde estavam. Elas se movem tão rapidamente que tudo que se pode ver são as pegadas que deixam atrás de si. Como um caçador, o Detector arma arapucas no caminho delas, para pegá-las quando passam em disparada. Depois que elas passam, suas interações elétricas de longo alcance deixam disrupções nos detectores dele, de tal modo que depois ele pode localizá-las. Talvez não seja muito "depois" para os seus padrões, mas na escala de tempo das partículas, elas já terão partido há muito tempo.

— Bom dia, o Detector os cumprimentou, fazendo um movimento incompleto em direção ao seu boné em deferência a Dorothy. — Querem saber sobre detecção de partículas. Isso é uma coisa complicada, não resta dúvida. Elas são umas coisinhas escorregadias e furtivas. São tão pequenas e rápidas que não há como pôr os olhos nelas, a não ser nas que têm carga elétrica. Quando se movem, suas cargas as revelam com bastante acerto. Elas têm seu campo elétrico, sabe. Ele se espalha por todos os lados, por mais que elas queiram passar discretamente. Grandes braços de eletricidade se estendem o suficiente para ser notados por gente como eu. Elas sacodem elétrons em átomos bem distantes do ponto por onde as partículas passam. Quando vão embora, deixam suas cercanias cheias de luz — fótons emitidos por elétrons excitados dentro dos átomos — e também cheias de carga elétrica — íons positivos e elétrons soltos que escaparam inteiramente de seus átomos. Há um bocado de lixo por todo lado, e eu o apanho com meus instrumentos. Na verdade, ele admitiu, dizer "cheio de luz e carga elétrica" é um pouco forte, mas fica coisa suficiente para trás para me dar razoável certeza de que as criaturinhas passaram por aquele caminho.

— Se não tivessem carga elétrica, as partículas poderiam simplesmente passar em disparada e você nunca saberia. É sempre o campo elétrico que trai a passagem de uma partícula, disse ele com alguma satisfação. — Como Detector mestre, trabalho através da interação eletromagnética dessas minúsculas partículas com meus instrumentos. EM e eu somos assim, acrescentou, fazendo com a mão um gesto dúbio que Dorothy interpretou como indicando uma estreita relação de trabalho.

— Aí está, portanto. Dêem uma olhada nisto, continuou, enquanto se virava e remexia em seu carrinho. Após um momento de procura ele se endireitou, segurando o que parecia ser uma lâmina de vidro embaçada. — Isto aqui é um cintilador, isso mesmo. Pode usá-lo para mostrar partículas quando elas tentam passar furtivamente por você. — Caminhou pela aléia do jardim até um canteiro de urânio e segurou a lâmina do cintilador sobre ele, protegendo-o contra a luz com a outra mão. Nas profundezas do material, puderam ver pequenos lampejos ocasionais de luz quando partículas alfa saídas de núcleos de urânio em decaimento calhavam de passar através do instrumento quando partiam.

— Aqui está. Pegamos as criaturinhas esquivas. Detectamos essas alfas ao passarem e assim sabemos que estavam ali. Na situação correta, pode-se fazer mais do que simplesmente mostrar que partículas estiveram num dado lugar. Você devia ver o trabalho que faço para o Reino do Cern.

— Onde fica e o que é isso, posso perguntar? disse Dorothy.

— É uma espécie de reino, como você poderia esperar. Fica só um pouco adiante, indo pela estrada, respondeu o Detector, que obviamente o conhecia bem. — É bastante pequeno e em sua maior parte subterrâneo, mas muita gente de todos os países vem visitá-lo. Eles vêm trabalhar com partículas. É uma grande colaboração de todas as raças. Se querem saber mais sobre partículas, sugiro que vão lá. É naquela direção, concluiu prestimosamente. — Só um pouco adiante pela Estrada dos Tijolos. A estrada passa bem através dele, de modo que vocês não têm como errar. Pé na estrada, portanto. Pode ser que eu os encontre por lá, pode ser que não — acrescentou, despachando-os com o que lhes pareceu uma pressa desnecessária. De todo modo, entenderam a insinuação e todos os quatro se despediram do Detector, bem como do Inspetor e do Jardineiro, e puseram o pé na estrada de novo.

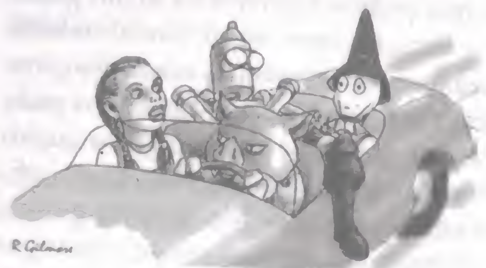
Seguiram por um pequeno trecho da estrada sem incidentes e, à medida que avançavam, a paisagem foi se tornando gradualmente rochosa e depois irregular e montanhosa. O caminho serpenteava em torno de um alto afloramento de rocha e sumia de sua vista, e, ao passar pelo lado mais próximo do mesmo morro eles viram uma rodovia plana que passava perto de sua trilha. Ao longo dessa nova estrada, puderam ver um carro se aproximando. Era um carro esporte — muito baixo, com curvas suaves e grandes canos de escapamento revestidos de cromo. No conjunto parecia ter sido construído para altas velocidades, embora naquele momento estivesse se deslocando bastante devagar.

— Por que não perguntamos se podemos dar uma volta nesse carro? perguntou Dorothy, que estava começando a se sentir um pouquinho cansada com toda aquela caminhada morro acima. Mal ela falara, o Leão saltou no meio da estrada e se postou no caminho do veículo que avançava. O carro reduziu a velocidade, deu uma guinada e pareceu prestes a acelerar desviando do Leão, mas o Sabichão de Lata agarrou sua traseira, erguendo as rodas do chão. O motor acelerou à medida que o motorista continuava com o pé no pedal, mas isso de nada adiantou. Embora os braços de tubo do Sabichão parecessem bastante magros, sua força metálica era capaz de suportar o peso sem dificuldade.

— Oh, lamento muito! exclamou Dorothy para o motorista ao ir correndo até ele. — Eu pretendia apenas levantar minha mão para lhe pedir que parasse. — O motorista soltou um grunhido e não deu nenhuma outra resposta. A um exame mais atento, ela viu que isso não era tão surpreendente. Ele era impressionantemente cor-de-rosa, com orelhas triangulares, pendentes, e um focinho

curto. Estava curvado sobre a direção, que agarrava firmemente com uma presunçosa pata fendida de cada lado.

— Não teria adiantado simplesmente *pedir* que parasse. Ele é um motorista porco e como tal não tem muita consideração pelos outros usuários da estrada, disse o Espantalho ao chegar até o carro.



— Bem, agora que você parou, teria a bondade de nos dar uma carona? Meus pés estão muito cansados. O porco apenas grunhiu de novo. Dorothy tomou isso como uma indicação de consentimento, e começou a entrar no carro. O Espantalho e o Sabichão de Lata se aboletaram ambos no banco de trás. O Espantalho, sendo basicamente um saco recheado de palha, não teve nenhuma dificuldade em se encaixar num dos minúsculos assentos traseiros. O Sabichão não era tão flexível, mas dobrando suas compridas pernas de metal de modo que seus joelhos se projetavam acima dos ombros, foi capaz de se acocorar ali como uma reluzente aranha metálica. Dorothy sentou-se no banco da frente ao lado do motorista. Quando olharam para o Leão, no entanto, ficou claro que ele era grande demais para caber ali fosse como fosse.

— Ó céus! exclamou Dorothy quanto percebeu isso. — Que vamos fazer? Não podemos deixá-lo para trás.

— Não se preocupe com isso, estrondeou o Leão, que por alguma razão não parecia ele próprio nada preocupado. — Podem simplesmente partir sem mim. Logo vou encontrá-los, no Reino do Cern, se não antes. — Virou-se bravamente e no mesmo instante o Motorista Imprudente pisou com força no acelerador e o carro partiu roncando. Dorothy olhou para trás para ver a enorme figura do Leão, agora parecendo bastante triste e pequeno enquanto encolhia gradualmente até sumir de vista.

O motorista continuava calcando o pé, ou melhor, a pata, com firmeza no acelerador, e de início o carro tomou impulso rapidamente. Com o passar do tempo, porém, não parecia estar se movendo tão depressa quando teria sido de esperar. Além disso, Dorothy notou que o cenário circundante tinha se tornado estranhamente distorcido.[7] Quando fez um comentário sobre essas coisas com o

7. Eu não disse de que modo o cenário estava distorcido. Isso não é tão simples como às vezes se pretende. Um tratamento mais detalhado, num estilo semelhante ao do presente trabalho, é dado na segunda seção de meu livro *Scrooge's Cryptic Carol.*

Espantalho, que obviamente estivera observando tudo, ele apontou uma placa de sinalização que haviam acabado de transpor. Ela dizia $c = 65$. — Que significa isso? perguntou nossa heroína.

— Está nos informando de um plano elaborado pelas autoridades municipais para evitar velocidades excessivas nas suas estradas. Fixaram a velocidade da luz localmente em 65km/h, de modo que nada pode andar mais rápido do que isso.

— Uma autoridade local tem esse poder?

— Não, normalmente não. Aqui eles adotam um procedimento legislativo particularmente poderoso, mas mesmo assim não conseguem realmente o efeito que pretendiam.

Enquanto ele falava, estavam se aproximando de uma faixa de pedestres, e exatamente nesse momento um pedestre decidiu atravessar. Uma vez tendo se lançado à sua aventura, começou a atravessar com uma letargia aparentemente suicida. O Porco Motorista aplicou todo o seu considerável peso sobre o pedal do freio, mas isso não teve qualquer efeito significativo sobre a velocidade do carro. Embora ainda estivessem viajando a bem menos que o máximo de 65km/h, os freios mal pareceram afetar sua velocidade e eles arremeteram pela faixa de pedestres sob o apavorado nariz da senhora amatronada que estava tentando atravessar.

— Que aconteceu? O freios falharam?

— Não, não foi isso, o Sabichão de Lata respondeu. — Trata-se de um simples efeito de se deslocar em qualquer velocidade próxima à da luz. Você pode notar que as pessoas falam *da* velocidade da luz. A velocidade dela é exatamente a mesma, quer você esteja se movendo em direção à fonte da luz ou afastando-se dela. Isso pode parecer estranho. Na verdade, é estranho. É preciso uma mescla especial de espaço e tempo para produzir isso. Tudo que passa nessa velocidade parece estar se movendo devagar. Você viu isso no caso da mulher na faixa de pedestres.

— O tempo e o espaço parecem ficar tortos quando vistos nessas velocidades. O movimento é relacionado com o espaço e o tempo, por isso toda a cinemática se desviou do que você espera. A energia e o momento assumem uma forma alterada. A velocidade do carro não pode se elevar acima da velocidade da luz. Na verdade, ele tem grande dificuldade até para se aproximar desse valor. No entanto, o momento pode se elevar sem limite. A aplicação de uma força de freamento reduz o momento como você poderia esperar, mas, lamentavelmente, isso resulta numa redução muito pequena da velocidade. Em conseqüência, as autoridades locais tiveram de admitir que sua idéia foi um fracasso. Agora estão planejando construir uma passagem subterrânea para pedestres.

O Sabichão de Lata não deu nenhum sinal de que estava concluindo seu discurso. — Se você quiser, ainda pode descrever o momento como produto da massa e da velocidade. Nenhum objeto pode ter uma velocidade maior do que a da luz.[8] No entanto, sua massa parece crescer sem limite à medida que se aproxima da velocidade da luz. Você encontra um comportamento semelhante no caso da energia. Também esta pode crescer sem limite. O momento fica maior tanto porque a velocidade está crescendo quanto por causa do maior peso efetivo. No caso da energia, o aumento se deve inteiramente ao crescimento da massa.

— A energia é igual à massa multiplicada pela velocidade da luz ao quadrado.[9] Energia e massa são realmente a mesma coisa. Descobre-se que a velha fórmula para energia cinética se deve unicamente ao minúsculo crescimento da massa que ocorre até em baixas velocidades. Mesmo quando não está se movendo, um objeto tem enorme energia. Isso é chamado de energia da massa em repouso. Normalmente você não a percebe porque a massa não muda. Só se vê mudanças na energia.

. . . .

Energia e massa

A teoria da Relatividade Especial faz muitas afirmações interessantes sobre o espaço e o tempo. Fornece também novas relações entre velocidade, momento e energia. Para nossos propósitos, o resultado importante é que massa e energia são realmente a mesma coisa. Quando partículas com alta energia colidem, parte dessa energia pode ser usada para fornecer a massa de novas partículas.

. . . .

O Sabichão de Lata parou após essa preleção inusitadamente longa. Teria tomado fôlego, desde que, é claro, tivesse fôlego.

— Você quer dizer que nossa massa está realmente crescendo quando nos movemos mais depressa? perguntou Dorothy, pasma.

---

8. Há uma possível confusão aqui. A velocidade *c* deveria de fato ser chamada "a velocidade limite", ou pelo menos "a velocidade da luz num vácuo". A velocidade nada tem a ver com a luz enquanto tal e, na realidade, a luz pode se propagar numa velocidade mais baixa em alguns casos. A luz atravessa a sua janela cerca de 40% mais devagar do que a velocidade *c*.

9. A energia é dada pela única equação física que se tornou parte da mitologia popular, a saber, $E = mc^2$. A velocidade da luz, c, é uma constante, de modo que energia e massa são de fato a mesma coisa em diferentes unidades. Você pode dar uma distância em milhas ou quilômetros e converter uma medida na outra se a multiplicar pelo fator de conversão apropriado. Efetivamente, o fator constante c^2 nada mais é do que um desses fatores de conversão.

— Sim, você poderia dizer isso. Certamente é verdade se você quer dizer que momento é simplesmente massa vezes velocidade. A massa medida em repouso é chamada massa em repouso. À medida que a velocidade se aproxima da velocidade da luz, o aumento no momento deriva sobretudo do aumento na massa. O aumento na energia é efetivamente apenas esse aumento na massa. De fato, a gravidade afeta a energia, de modo que é mais simples dizer que a massa sob a ação da gravidade está mudando. Massa e energia são a mesma coisa.

— Minha nossa! disse Dorothy. — Se a massa ou a energia podem mudar tanto, não será preciso uma grande quantidade de combustível para ir a algum lugar numa velocidade próxima à velocidade da luz?

— Certamente, respondeu o Sabichão de Lata. — Na verdade... — Nesse ponto o ronco da máquina parou abruptamente. Todos olharam para o indicador de combustível, que estava registrando "vazio" de uma maneira definitiva. O porco calcou sua pata no pedal do freio, mas, como antes, a velocidade em que avançavam não se reduziu perceptivelmente em conseqüência disso.

Foram seguindo em frente, com pouco efeito observável, afora um cheiro de borracha queimada. Finalmente sua velocidade diminuiu sensivelmente, e pouco depois eles paravam bruscamente à beira da estrada. Aquele lugar tinha algo que parecia vagamente familiar, e a sensação foi muito reforçada quando, do lado de um alto afloramento de rocha, surgiu a figura instantaneamente reconhecível do Leão Confiante.

— Como chegou até aqui? Dorothy perguntou, assombrada.

— Estive aqui o tempo todo. Foi aqui que me deixaram, respondeu o Leão, com entusiasmo. — Vocês acabaram chegando de volta ao seu ponto de partida.

— Ai, ai! exclamou Dorothy. — Que perda de tempo! Pelo menos não demorou muito. Só estivemos fora por alguns minutos.

— Ao contrário, corrigiu o Leão. — Vocês estiveram fora durante quase uma hora. É o efeito da dilatação do tempo, sabe.[10] Mas não se preocupe, não

---

10. Você pode se perguntar por quê, do fato de terem visto o pedestre se mover na faixa de pedestres tão lentamente, resultou que, quando o grupo voltou a se encontrar de novo, foi o Leão estacionário que tivera tanto tempo ocioso. A Relatividade Especial trata de movimento uniforme constante, e diz que esse movimento é inteiramente relativo. Tanto um pedestre quanto um ocupante do carro verão o tempo como passando mais lentamente para o outro. Então por que há alguma diferença final? Esse "Paradoxo dos Gêmeos" é mais amplamente tratado em meu livro *Scrooge's Cryptic Carol*. A consideração essencial é que se você acaba voltando para o ponto de partida, claramente não pode ter estado se movendo numa velocidade uniforme em linha reta, como é requerido pela consideração convencional da Relatividade Especial. Há uma assimetria no movimento.

foi um tempo perdido. Consegui rascunhar os três primeiros capítulos de um novo livro.

— Quer dizer que estivemos andando em círculos todo o tempo que passamos fora?

— Bem, estiveram. Vocês estavam numa estrada circular, sabe. Ficar dando voltas em um círculo é uma tradição importante nestas paragens.

— Por que isso? A que paragens você se refere? Onde estamos?

— Oh! você não sabia? perguntou o Leão, inocentemente. — Nesse caso basta me acompanhar.

Desceram do carro, com várias palavras de agradecimento para o Porco Motorista que, perdido em melancólica contemplação de seu tanque de combustível vazio, apenas grunhiu em resposta. Juntos, seguiram o Leão, contornando a rocha que impedia o caminho e viram que a Estrada dos Tijolos seguia direto para uma porta maciça encaixada na encosta do morro. Sobre ela havia uma tabuleta que declarava, em letras gravadas muito precisas, O REINO DO CERN.

7

O Reino do Cern

O grupo de viajantes parou e contemplou surpreso a porta maciça que bloqueava seu caminho para o Reino do Cern.

— Você sabia que estávamos tão perto da entrada? perguntou Dorothy.

— Oh, sim! respondeu o Leão com irritante complacência.

— E simplesmente nos deixou partir naquele carro e ficar dando voltas por uma estrada circular quando poderíamos ter ficado aqui, continuou a menina com crescente irritação.

— Fiz isso. Mas *era* necessário, entende? o Leão se apressou a explicar ao começar a sentir certo antagonismo. — Você precisa saber que massa e energia são a mesma coisa se quiser entender de algum modo o que vai ver dentro dos túneis do Cern. Além disso, acrescentou, ficar dando voltas em círculos está muito em moda no Cern. É melhor você se acostumar com a idéia. Agora, chega de discutir, vamos. — O Leão se virou e seguiu caminhando com a cauda orgulhosamente empinada. Os outros o seguiram até a entrada, onde ele bateu imperiosamente numa área de pedra lisa que havia ao lado. A superfície de pedra deslizou para o lado para revelar um postigo, atrás do qual sentava-se o guardião do portão metido num uniforme caprichosamente bem passado.

— Deixe-nos entrar, ordenou o Leão com ar senhoril.

— Antes que possa fazê-lo, cada um de vocês deve responder corretamente a uma pergunta. Não me culpem. Todo mundo me culpa, mas são as normas. Faço simplesmente o que me mandam fazer.

Como o Leão parecia prestes a discutir, o Espantalho afastou-o gentilmente para um lado e se voltou para o guardião. — Faremos, é claro, tudo que for exigido, disse diplomaticamente. — Formule suas perguntas.

— Certo! disse o porteiro, olhando para uma lista impressa que tinha diante de si. — Certo, vamos começar. Vejamos, continuou, fixando um olhar penetrante no Espantalho, diga-me, qual é a finalidade fundamental do Cern?

O Espantalho pensou por um momento e em seguida, sendo observador, bateu o olho numa plaquinha fixada do lado da entrada, perto da tabuleta com o

nome gravado. Dizia: *Declaração de missão: Nossa finalidade fundamental é investigar as propriedades básicas da matéria.* Repetiu exatamente isso. — Correto, murmurou o guardião, riscando essa pergunta de sua lista. — Agora, senhor, disse, voltando-se para o Sabichão de Lata enquanto todos se amontoavam diante de seu postigo, poderia por favor me dizer a raiz quadrada de 18769?

O Sabichão de Lata respondeu imediatamente "137" e o guardião riscou essa pergunta de sua lista. Em seguida ele se virou para o Leão. — E o senhor, poderia por gentileza me dizer a principal propriedade que distingue os férmions dos bósons? — O Leão respirou fundo e se aboletou sobre as ancas. — Em não mais de 12 palavras! acrescentou o porteiro, impaciente.

— Os férmions obedecem ao Princípio de Exclusão de Pauli, retrucou o Leão, com um olhar feroz para seu interrogador. — Os bósons, não. acrescentou para usar sua cota toda.

— Agora, minha cara, disse o porteiro num tom bastante condescendente ao se voltar para Dorothy. — Você também gostaria de entrar no Cern?

— Sim, por favor, ela respondeu. Tendo vindo até tão longe, não havia outra resposta possível. — Qual é minha pergunta, por favor?

— Era essa, retrucou o funcionário, e você respondeu corretamente, pelo que posso julgar.

— Isso não foi propriamente uma pergunta! disse a menina com bastante energia. De certo modo, tinha a impressão de ter sido trapaceada.

— Ninguém afirmou em momento algum que as perguntas seriam difíceis. A política das autoridades do Cern é encorajar os visitantes, de modo que tenho de escolher perguntas que as pessoas sejam capazes de responder. Agora todos podem entrar, concluiu, enquanto apertava um botão no painel que tinha à sua frente. Com um rangido baixo a porta maciça escancarou-se para revelar um longo túnel que penetrava fundo no subsolo.

Ligeiramente amedrontados, os quatro companheiros caminharam para a escuridão. À medida que a luz do dia desaparecia atrás deles, no entanto, descobriram que o túnel, afinal de contas, não era assim tão escuro. Havia luzes a intervalos ao longo das paredes e uma luz mais forte mais adiante. Esta aumentou quando foram chegando ao fim do túnel de entrada e penetraram numa grande caverna, brilhantemente iluminada, com pessoas passando constantemente de um lado para outro, entrando e saindo dos muitos outros túneis que se abriam por todos os lados.

— Que lugar confuso e que quantidade de gente! exclamou Dorothy.

— Sim, é um lugar muito freqüentado. Não há tantos habitantes permanentes, mas há um grande número de visitantes que vêm trabalhar aqui. É uma colaboração entre pessoas de todos os países e raças, sabe. Incluindo algumas

que você poderia considerar ligeiramente míticas, o Leão acrescentou após pensar melhor.

— Elas parecem sem dúvida muito determinadas em suas atividades. Gostaria de saber para onde devemos ir agora!

— Talvez devamos perguntar naquela pequena cabine ali, respondeu o Espantalho, que havia observado no centro da área uma barraquinha que trazia o cartaz INFORMAÇÕES PARA OS VISITANTES. Todos concordaram que essa seria a melhor idéia, e se encaminharam para lá.

Em frente da cabine havia um postigo semelhante àquele ao lado do portão principal e atrás havia uma figura tão caprichosamente vestida quanto o outro recepcionista. Usava um alinhado terno escuro e uma gravata sóbria. Tinha cabelos lisos partidos com precisão e um bigode pequeno mas primorosamente penteado. Olhou para eles atentamente.

— Com licença, Dorothy se dirigiu a ele. — Poderia nos informar por favor onde deveríamos ir para descobrir sobre partículas e coisas assim? Disseram-nos que este era o lugar onde deveríamos vir.

— Certamente é, ele respondeu com o que só pode ser descrito como entusiasmo preciso. — Há muita coisa para vocês verem, mas os túneis são confusos demais para que eu possa descrevê-los rapidamente. Temo que logo se perderiam. O melhor é guiá-los eu mesmo por aí. Dêem-me licença enquanto dou um jeito de sair desta cabine.

A menina ficou pensando por que ele teria de dar um jeito de sair da cabine, e lançou um olhar para a parte de trás dela, onde supunha que estava a porta. A porta estava lá, não havia dúvida, mas ficou surpresa ao ver saindo por ela a traseira de um cavalo. Enquanto olhava, a traseira recuou cuidadosamente pela abertura para revelar, em vez do pescoço de um cavalo normal, o torso do homem de aparência elegante que estivera conversando com eles. As patas dianteiras do cavalo estavam vestidas com calças de vincos perfeitos. Dorothy se divertiu ao notar que ele usava polainas recobrindo seus cascos dianteiros. Todo o grupo pregou os olhos nele.

— Por que estão parecendo tão surpresos? ele perguntou. — Nunca pediram informação a um Centauro de Informações para Visitantes antes? Agora, vamos adiante. Vocês têm muito o que ver.

Saiu trotando com determinação e os outros o seguiram obedientemente. Ele os conduziu por um caminho impossível de memorizar através de corredores sucessivos, cada vez mais subterrâneos. Dorothy perguntou se estavam descendo para alguma espécie de mina.

— Num certo sentido, sim — foi a resposta, — mas só uma mina de informação. Estamos seguindo um túnel em busca não de ouro ou jóias, mas de algo



mais valioso: conhecimento. Aqui buscamos descobrir tudo que podemos sobre o funcionamento do mundo físico.

Enquanto ele falava, um grupo de sete anões jocosamente diferentes saiu marchando por um túnel de um lado e desapareceu em outro do lado oposto. Enquanto passavam, os que os observavam ouviram um fragmento de uma entusiástica canção:

Eu vou, eu vou, procurar um quark eu vou.

O centauro ignorou essa interrupção e continuou com suas observações preliminares.

— O melhor que têm a fazer é começar com uma introdução aos anéis. É assim que chamamos os aceleradores circulares que impulsionam as partículas até as energias mais altas de que precisamos. Eles são grandes anéis de magnetos que passam através de túneis na rocha à nossa volta.

— Para que precisam de partículas de alta energia? perguntou Dorothy, bastante temerosa de estar perdendo um ponto vital.

— Um de nossos principais objetivos é buscar novas partículas — isto é, partículas que podem existir, que existem em princípio, e muito possivelmente foram importantes em algum outro lugar do Universo. Ocorre apenas que, neste momento, elas não estão à mão *aqui*. Sendo tão raras (na verdade, desconhecidas) aqui, nós temos de fazê-las. As partículas geralmente têm massa, de modo que temos de fazer isso também. Como massa é energia e inversamente, energia é massa, se tivermos partículas com energia sobressalente, então essa pode ser usada na produção da massa de novas partículas.

— Eu lhes disse que precisariam ter ouvido falar que massa e energia são a mesma coisa antes de chegarmos aqui, encaixou o Leão, sussurrando com a audibilidade completa que lhe era costumeira.

— Quando tivermos visto os aceleradores, continuou seu guia, retornando a seu discurso preparado, poderemos passar a ver alguns dos detectores de partículas e observar os resultados que produzem. Antes, porém, vamos visitar a sala principal de controle. — Conduziu-os para uma porta imponente e os fez entrar.

— Esta é a sala principal de controle para todo o sistema de aceleradores, ou anéis, como os chamamos. A operação das máquinas é controlada a partir daqui.

Eles viram em torno da sala vários painéis de controle a que se prendiam superfícies de trabalho. Papéis e cadernos se amontoavam nessas superfícies de maneira aparentemente casual, mas deliberada. Num teclado em frente ao painel mais próximo estava sentada uma figura atarracada usando uma camiseta com uma gola inusitadamente larga para acomodar a maciça cabeça de touro que se erguia de seus ombros. Nas costas da camiseta estava impressa a mensagem *Meus pais foram a Creta e tudo que ganhei foi esta camiseta idiota.* Ele estava examinando atentamente uma espécie de tela de computador diante de si e fazendo ajustes ocasionais em seu teclado.

— Esse é o engenheiro encarregado, que mantém uma vigilância contínua sobre a operação das máquinas. Como vêem, é capaz de monitorar cada componente em sua Tela Minotauro especial. O objetivo das máquinas é acelerar feixes de partículas a altas energias. Para isso elas são aceleradas repetidamente à medida que viajam vezes sem conta em torno de um grande anel de magnetos. Aqui está o Zelador do Feixe, que vai explicar como isso é feito.

Nessa altura uma figura gorda entrou na sala de controle. Tinha cabelo preto e lustroso e um volumoso bigode preto. Usava uma camisa safári e calças de tecido canelado. As calças eram presas por um grosso cinto de couro a que estava pendurado um chicote comprido e enroscado. O chicote era especial pelo fato de que zunia e estalava, lembrando as vívidas descargas do bastão elétrico de EM.

— Querem saber como treinamos partículas e as submetemos à nossa vontade? perguntou ele, num tom bastante agressivo. — Bem, estão falando com a

pessoa certa. Sou de fato um *domador de partículas*, muito parecido com os domadores de leão que vocês podem ter encontrado no seu mundo.

O Domador e o Leão trocaram breves olhares, mas ambos decidiram não levar a questão adiante.

— Mostro num instante às partículas quem manda aqui, continuou o Domador, desprendendo seu notável chicote do cinto. — Qualquer uma que tenha uma carga elétrica tem de obedecer a meu chicote eletromagnético. Deixem que lhes mostre. Posso ver alguns prótons se escondendo ali no canto. Eles vão dar uma boa demonstração, pois são os mais fáceis de se treinar.

Aproximou-se do grupo de partículas e deu uma chicotada em direção a elas. O campo elétrico atuou sobre a carga positiva do próton, acelerando as partículas ao longo daquela direção. Em seguida ele mudou de tática e enrolou o chicote, segurando-o acima dos prótons em fuga. Espontaneamente eles deram uma guinada para um lado em sua trajetória.

— Aí vocês vêem dois usos de forças elétricas no controle de partículas, comentou ele enquanto continuava seu trabalho. — O campo elétrico direto fará as partículas se moverem rapidamente sob meu comando. O campo magnético produzido por uma corrente elétrica circular vai então controlar a direção de seu movimento. Posso fazê-las pular através de arcos, ou pelo menos posso facilmente fazê-las dar voltas em torno de anéis ao meu comando. — Para ilustrar, com sucessivos piparotes de seu chicote, ele as fez moverem-se ainda mais rapidamente, enquanto as fazia curvar de modo a perfazer um círculo em sua corrida.

. . . .

Eletromagnetismo

O nome é compósito de *eletricidade* e *magnetismo*, que vêm a ser a mesma coisa.

As forças elétricas atuam entre cargas elétricas, e há duas variedades delas com diferentes sinais, positivo e negativo. Cargas com o mesmo sinal se repelem, ao passo que cargas opostas se atraem. Em torno das cargas há um *campo elétrico*, e este vai acelerar as cargas na direção da linha que as une.

Se estão em movimento, as cargas constituem uma *corrente elétrica*. Uma corrente elétrica, seja num rolo de arame ou dentro de átomos de ferro, vai gerar um *campo magnético*. Um campo magnético vai exercer uma força sobre uma carga *em movimento* que atua em ângulos retos com sua direção de movimento, de modo que a trajetória da partícula vai se curvar em um círculo.

. . . .

— Podem ver por vocês mesmos o comportamento global do acelerador naquele diagrama ali. — Apontou para uma grande tela montada bem alto na

parede. Ela mostrava três anéis de tamanho crescente, ligados entre si por linhas tangenciais. Um pequeno grupo de luzes movia-se pela superfície do quadro. As luzes tinham acabado de penetrar no menor anel e passaram a correr em torno dele muitas vezes.

— Essas luzes representam uma explosão de prótons que foi injetada no pequeno anel acelerador e agora está circulando em torno dele. Os prótons são forçados a se deslocar numa trajetória circular por grandes eletromagnetos dispostos a espaços em volta do anel. Esses magnetos defletem os prótons e curvam sua trajetória para que se encaixem no anel. Cada vez que um grupo de partículas completa uma órbita, passa através de uma cavidade em que um campo elétrico atua sobre ele. Esse campo dá um empurrão em cada uma das partículas e aumenta ligeiramente seu momento. Logo elas estão se movendo tão depressa em sua corrida frenética que se deslocam quase à velocidade da luz. Depois disso sua velocidade real não varia muito, mas seu momento continua aumentando. À medida que as partículas ganham momento, a máquina aumenta a força dos campos magnéticos de maneira correspondente, fazendo assim com que as partículas continuem se movendo precisamente na mesma trajetória, ao longo do centro de um estreito tubo.

— Que há dentro do tubo? Dorothy achou que devia dizer alguma coisa para mostrar que estava convenientemente atenta.

— Não há nada dentro dele. Isto é, contém algo tão perto do nada quanto é possível se arranjar. As partículas se deslocam num bom vácuo. De outra maneira, seriam dispersadas em conseqüência de colisões com átomos presentes no ar e se extraviariam do feixe. Depois de terem dado muitas voltas em torno do anel e de terem sido aceleradas a cada volta, elas terão adquirido um grande momento. A força do campo magnético necessária para mantê-las na mesma trajetória, quando elas têm esse momento tão aumentado, torna-se a maior que é possível construir na prática. Nesse estágio as partículas devem ser transferidas para um outro anel, maior.

O grupo de luzes na tela da parede, tendo circulado o anel menor muitas vezes, desviou-se subitamente para a linha que conectava o anel menor ao intermediário. Logo se transferiu para esse anel e começou a dar voltas em torno dele.

— Nesse anel maior o curso das partículas não é tão acentuadamente curvo e por isso um campo magnético mais fraco é capaz de mantê-las na órbita requerida. Elas podem portanto ser aceleradas a um momento e uma energia ainda mais altos antes de atingir o limite dos magnetos. Quando o feixe de partículas adquire um momento tão alto quanto esse anel é capaz de conter, elas são transferidas para o anel final. Este tem um diâmetro muito maior e uma trajetória

curva muito mais suave, podendo assim lidar com partículas de momento ainda mais alto.

— Quando foram aceleradas até sua energia máxima, as partículas são defletidas e focalizadas, de modo que possam colidir com outras partículas — ou com núcleos de átomos num alvo estacionário, ou com um feixe de partículas que está circulando a máquina na direção oposta. Esta segunda opção é implementada num acelerador de *colisão de feixes*, em que os momentos das partículas que se movem em direção oposta anulam-se mutuamente, reduzindo-se a zero. Toda a energia presente numa colisão pode então ficar disponível para a produção das massas de novas partículas.

No diagrama, as luzes davam voltas e mais voltas em torno do anel maior, e então, abruptamente, simplesmente desapareceram. Isso ocorreu porque as conseqüentes colisões não faziam parte do processo de aceleração e já não eram da responsabilidade do Zelador do Feixe. Ele havia entregado o feixe, e assim realizado sua missão, mas de qualquer maneira aquilo foi um anticlímax. Uma nova explosão de partículas começou sua viagem, e novamente um grupo de luzes entrou no anel menor.

— Parece que tudo que vocês fazem usa forças elétricas ou magnéticas. Eu pensava que vocês estavam envolvidos aqui sobretudo com essa interação nuclear forte de que ouvi falar, disse a menina.

— Oh, realmente. Nosso *objetivo* aqui é examinar as forças fortes. Nosso problema, no entanto, é que o âmbito em que essas forças atuam é extraordinariamente pequeno — praticamente apenas o tamanho de um núcleo. Não podemos detectar nenhum efeito sobre distâncias grandes o bastante para serem percebidas no mundo do dia-a-dia, e a única maneira de sondar interações em distâncias tão curtas é fazer as partículas realmente colidirem entre si e em seguida examinar os resultados. Para fazer isso devemos ser capazes de acelerar partículas, guiá-las para uma colisão e detectá-las posteriormente. Como lhes disse inicialmente, os aceleradores, os detectores — todas as máquinas que usamos — têm de lidar com as partículas através de suas cargas elétricas. Este é realmente o único meio pelo qual podemos manejá-las ao longo de qualquer distância razoável. Suas interações fortes têm alcance reduzido demais para ser de qualquer utilidade aqui.

— Embora nossos objetivos se situem no domínio nuclear, nossos métodos, como a maioria das coisas no mundo, estão na esfera de EM. Os dispositivos que nos servem são todos dela, e ela está sempre conosco. Veja!, ele acrescentou, apontando para uma grande janela que se abria na sala de controle. Além dela, através de uma persiana, viram vagamente a figura alta de EM de pé



diante de uma escrivaninha. Atrás da escrivaninha havia uma figura maciça moldada de sombra e sugestiva de poder — um poder vigoroso abaixo da Terra.

— Quem é ele? eles perguntaram a seu guia, que ficara parado em silêncio num canto durante toda a demonstração do Zelador.

— Aquele é o Diretor de toda a nossa divisão do acelerador. É o responsável geral pela aceleração de todas as partículas em nossos aceleradores. É o Mestre do Picadeiro para nosso circo de partículas. É o Senhor dos Anéis, respondeu o Centauro num tom de temor reverencial. — Mas agora vamos, continuou. — Vamos passar ao salão experimental, o lugar em que as colisões acontecem e as partículas revelam seus segredos. — Conduziu-os da sala de controle para um corredor. Passaram por uma sala cuja porta estava parcialmente aberta e dentro viram um grupo de homenzinhos envergando paletós verdes e calções atados sob os joelhos, todos amontoados em torno de um arco-íris completamente circular. No fundo puderam ouvir uma voz suave que cantava *"Em algum lugar além do arco-íris"*. O guia notou a direção dos olhares do grupo e explicou a cena.

— Isso é parte de nosso esforço de planejamento de futuros aceleradores. O arco-íris que viram ali é um exemplo do que chamamos de projeto "céu azul" criado por nossa equipe LEPrechauns.[1] O projeto tem uma falha grave.

1. LEP é a sigla do acelerador Large Electron Positron instalado no Cern em Genebra.

— E qual é ela? três vozes perguntaram em uníssono.

— Ocorre simplesmente que, quando você encerra um arco-íris na forma circular de um acelerador, ele deixa de ter fim, e para se poder construir o acelerador primeiro será preciso encontrar o pote de ouro que fica no fim do arco-íris. Vamos lá, continuou antes que alguém pudesse reagir a essa última observação. — A máquina principal acaba de ser temporariamente desativada, e poderia ser interessante para vocês ir até o salão experimental através do próprio túnel do acelerador.

Caminhando pelo corredor, passaram por vários homens de terno preto. — São Gnomos, confidenciou o Centauro.

Dorothy deu uma olhada para eles. Continuavam parecendo simplesmente homens de terno preto. — Não correspondem à minha idéia de gnomos. De fato, não me dão a impressão de ter nada de mítico, declarou.

— Oh, não são mesmo. São banqueiros de Zurique. Estão nos ajudando com nossas finanças. Embora nosso objetivo básico seja o conhecimento, conhecimento puro, as finanças continuam sendo muito importantes para nós.

O Centauro os fez transpor uma porta maciça que estava aberta e logo eles se viram numa galeria longa e curva. Só se podia dizer que era curva olhando-se ao longe para a perspectiva que se encolhia na distância. À primeira vista parecia perfeitamente reta, tão suave era a curvatura. De um lado, a intervalos ao longo do túnel, havia algumas formas maciças, como estranhos sepulcros metálicos. Estavam pintados com cores vistosas, e cada um era atravessado por um tubo de metal não muito diferente de um cano de água doméstico exceto pelo acabamento primoroso. Eram os magnetos e o tubo de feixes que percorria cada um deles. Dentro dos invólucros de metal estavam os rolos de grossos cabos metálicos usados para produzir os intensos campos magnéticos requeridos. Entre os magnetos, um incrível conjunto de equipamentos se acumulava pelo tubo. Havia as bombas que criavam vácuo, havia sensores de todos os tipos para confirmar a posição do feixe de partículas; havia aparelhos cuja finalidade era difícil de imaginar. Muito provavelmente, eram aparelhos cujo propósito ninguém mais conseguia lembrar. Em volta, embaixo e através de tudo isso, havia grandes rolos de cabos e tubos de alimentação pintados em cores codificadas para mostrar sua finalidade. O grupo caminhou através de tudo isso em silêncio. Nenhum comentário parecia apropriado a essa complexidade.

Finalmente, após andar o que pareceram quilômetros ao lado dessa máquina diversificada mas repetitiva, seu guia os fez sair do túnel. Passaram por outra porta pesada e entraram numa espécie de área de montagem, uma sala cavernosa com pé-direito alto. Enormes peças de equipamento espalhavam-se por toda parte. Sem nenhuma razão particular, uma robusta coluna perto deles atraiu o

olhar de Dorothy. Tinha uma plataforma no topo, e quando a menina levantou a vista pôde ver, empoleirada nela, uma criatura semelhante a uma gárgula de olhos grandes.

— Por que ele está ali? ela perguntou.

— É um de nossos vigias noturnos. É um *ghoul*, e esses seres têm uma visão noturna muito boa. Está no alto de uma coluna, continuou, motivado por um antigo hábito de explicar coisas para grupos de turistas, porque isso lhe proporciona o melhor campo de visão sobre toda a área.

— E por que a coluna está assentada sobre rodinhas? Dorothy acabara de notar essa característica.

— Ah, isso. É por mera conveniência. A administração está sempre mudando as colunas dos *ghouls* de lugar, entende?

O Centauro trotou elegantemente para o meio do piso e deu uma pirueta para se pôr de frente para sua audiência, que o seguira obedientemente.

— Este é um salão experimental onde os detectores de partículas são montados antes de serem colocados no feixe que vem do acelerador. Vejo que um especialista neste assunto acaba de chegar. Vou lhe perguntar se pode vir falar com vocês.

Eles olharam para o outro lado do salão e viram se aproximar o Detector, que tinham visto pela última vez no Jardim Atômico. Ele os cumprimentou com afabilidade.

— Vejo que desta vez você não traz seu carrinho de mão com equipamentos, comentou o Espantalho, que era bom para observar esse tipo de coisa.

— Não, companheiro, disse o Detector com uma risadinha. — Este trabalho é um pouco grande demais para aquela coisinha. — Enfiou a mão no bolso e tirou um pequeno apito, que soprou com força num tom agudo. Uma ampla porta se abriu de um lado do salão para revelar um túnel largo que se estendia além e, parada diante da porta, uma frota de enormes caminhões. Estes se aproximaram e estacionaram em torno da borda da área. — Esse material é enormemente pesado, em parte. Precisamos de um pouquinho de içamento pesado aqui para pô-lo na posição correta.

Caminhou lentamente até um pedestal que se encontrava num vão a um lado. Sobre ele havia uma lâmpada de latão antiga que passou a esfregar vigorosamente. Nada aconteceu por um momento, até que uma voz disse: — Vá embora. Esta é a nossa pausa para o chá. — Por algum tempo, todos ficaram parados ali em volta, vagamente desconfortáveis e, durante esse intervalo, Dorothy notou que havia letras finamente gravadas no lado bojudo da lâmpada. Elas diziam

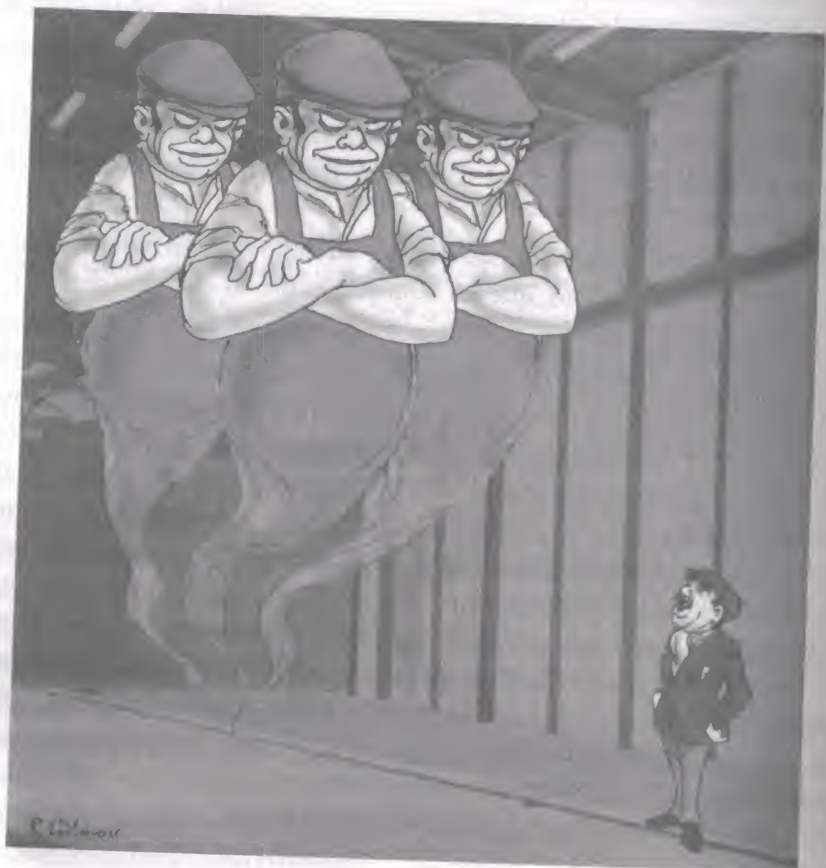
UAGDA

Desejos somente pelos preços do sindicato

— Que quer dizer isso?

— Quer dizer que este é o quartel-general da União Amalgamada dos G-nios, Demônios e Afins, explicou seu guia.

Como esta confabulação levara certo tempo para terminar, o Detect achou que valia a pena dar mais uma vigorosa esfregada na lâmpada. Desta v o efeito foi imediato. Uma nuvem de fumaça brotou da lâmpada, adensando- e encapelando-se em direção ao teto da grande caverna. Avolumou-se no ar s bre suas cabeças e aglutinou-se para formar o torso imenso de uma figura de br ços cruzados sobre uma roupa de caldeireiro cuja parte inferior se desvane num farrapo residual de fumaça. Olhou para eles de cara fechada sob um bo de pano. Em seguida, uma segunda e uma terceira nuvens de fumaça saíram lâmpada, e logo havia três figuras gigantescas pairando sobre eles. A apariç



central não fez exatamente uma reverência, mas pelo menos esboçou um aceno com a cabeça. Então falou.

— Qual é o seu desejo, meu *mestre*? A última palavra era carregada de nítida ironia. — Seu desejo é minha ordem. Embora, se não gostarmos dele, vá ser comunicado à próxima reunião da irmandade, acrescentou sombriamente.

— Parem de embromar e tratem de remover essa carga — retrucou o Detector. — Preciso de vocês, os Gênios, para ter tudo no lugar e pronto para partir antes que o feixe do acelerador dispare de novo. Portanto, tratem de começar logo com isso, concluiu rudemente.

— Como vão conseguir erguer objetos tão grandes? a menina perguntou ao Centauro, que estava quieto ali perto.

— Vão usar uma Funda dos Gênios. Preste atenção.

Apesar de sua atitude inicial truculenta, as três formas puseram-se ao trabalho de maneira enérgica e em uníssono. Embora *parecessem* uma grande nuvem, não demonstravam nenhuma dificuldade para carregar grandes tanques e blocos de ferro, cada um pendurado numa complexa armação de cabos grossos. Em pouco tempo haviam descarregado os caminhões e reunido rapidamente as cargas numa grande estrutura compactamente maciça, completamente revestida com um magneto de ferro, furada aqui e ali por buracos através do quais brotavam milhares de cabos dispostos em feixes grossos. O dispositivo estava situado perto de uma parede de concreto que evidentemente separava essa área da região do acelerador.

— Pronto, o detector acabado! disse o Detector orgulhosamente.

Nesse instante sinos começaram a tocar de repente em toda parte, uma buzina soou insistentemente e luzes coruscaram sobre placas de avisos por toda a área. — É o acelerador! exclamou o Centauro, empinando-se de susto. Sua tão bem arrumada metade humana ergueu-se bem acima da cabeça de Dorothy, e ela teve uma visão engraçada dele como um cavalo tentando se livrar de um manequim de alfaiate com que havia se enredado.

Não era hora para essas fantasias, no entanto. Os três Gênios trabalharam ainda mais prontamente sob a direção do Detector. Deslocaram rapidamente os imensos blocos de concreto que protegiam o acesso ao acelerador, moveram o aparelho para a área além dele e voltaram a fechar a abertura imediatamente. Durante todo esse tempo os sinais de alarme continuavam.

O acelerador estava começando a funcionar agora, preparando-se para emitir explosões de partículas eletricamente carregadas através desse novo detector a energias muitas vezes maiores que as de suas massas de repouso. Os ruídos cessaram, as luzes se aquietaram num brilho de advertência, e feixes de partículas chisparam em direções opostas através da câmara central do aparelho.



Todos se agruparam diante de uma grande tela que, notavelmente, mostrava o interior do complexo equipamento, fornecendo uma clara visão da câmara central, através de todas as camadas de ferro magnetizado e outros materiais.[2] A câmara detectora estava cheia de milhares de finos arames, cada um deles o centro de um intenso campo magnético local. Nesse campo, a ionização proveniente das partículas produzia breves descargas elétricas, de tal modo que as partículas deixavam pegadas de fogo à medida que passavam, seus rastros aparecendo claramente na tela diante de Dorothy.

A maior parte dos feixes de partículas simplesmente passava célere, em linha reta e sem uma colisão; ocasionalmente, porém, duas delas colidiam de frente. Quando o faziam, lançavam borrifos para os dois lados, e os observadores podiam ver que, embora somente duas partículas tivessem colidido, o número delas que resultava da colisão era muito maior. Dorothy perguntou a si mesma em voz alta por que isso acontecia, e desta vez foi o Leão que respondeu. A menina ficou um pouquinho surpresa com o silêncio que ele conseguira manter por tanto tempo.

2. Isto é muito parecido com o que realmente acontece. A visão que se tem é construída por computadores que usam a informação transportada por todos os cabos.

— Você está vendo *produção de partículas.* Lembra-se de como foi explicado, durante a viagem de carro, que energia e massa são essencialmente a mesma coisa? Bem, neste caso, as partículas que colidiram têm ambas energias muito maiores que as de suas massas em repouso. Quando estão se movendo por si próprias, não podem se desvencilhar de nenhuma parte dessa energia, porque ela acompanha o momento que têm. Quando colidem de frente, seus momentos se anulam. Elas se espatifam juntas para produzir um objeto compósito. Este tem um momento muito pequeno, mas ainda conserva toda a energia que estava lá antes. Como não é mais necessária para acompanhar o momento, a energia fica disponível para a formação de novas partículas, e foi isso que aconteceu.

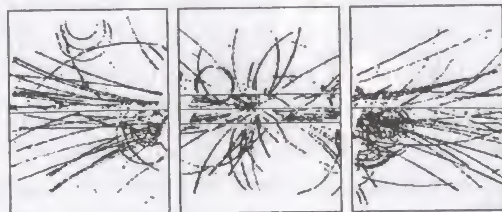
Agora que estava com a palavra, o Leão não abriria mão dela facilmente. — As partículas produzidas são geralmente bósons, porque os bósons não se conservam. Se você tem a energia disponível para fazer a massa deles, então, todas as coisas sendo iguais, pode criar bósons livremente. Eles podem ser criados um por um ou vários ao mesmo tempo; depende da energia que você tem.

Colisões de partículas

As partículas elementares são muito menores do que os comprimentos de onda da luz visível, e por isso não podem ser vistas a olho nu. É preciso examiná-las com algo que tenha um comprimento de onda menor, e, como dado pela relação de Broglie no capítulo 3, isso significa partículas de momento elevado.

É possível fazer feixes de partículas se dispersarem, e o exame das partículas que resultam dessas interações revela muito sobre elas. Uma análise detalhada mostra, por exemplo, que a dispersão se dá a partir de objetos puntiformes dentro do feixe de partículas: esses são os quarks.

A figura abaixo mostra uma grande saraivada de partículas secundárias criadas a partir da energia de dois feixes de partículas em interação que entram pela esquerda e pela direita e colidem no centro. Essa figura foi reproduzida com a permissão do Cern [Laboratório Europeu para a Fisica de Partículas], em Genebra.



— Que quer dizer por "todas as coisas sendo iguais"? perguntou Dorothy. Suspeitava de que essa condição envolvia complicações desconhecidas.

— Quer dizer que depende das outras propriedades que os bósons têm. Eles podem transportar uma carga elétrica, por exemplo. A carga elétrica se conserva por si mesma. Você não pode simplesmente criar uma carga elétrica positiva ou negativa. Pode, contudo, criar uma carga positiva *e* uma negativa juntas, porque nesse caso a carga total é zero e você na verdade não criou carga alguma. Muitas das partículas que se produziram são provavelmente do tipo conhecido como píons, pois eles são muito leves e a criação de suas massas não exige muita energia. Com píons você consegue mais partículas pelo seu dinheiro, ou melhor, por sua energia, mas pode haver também um pequeno número de partículas mais pesadas.

— Você *pode* obter tanto férmions quanto bósons, ele continuou. — Mas os férmions têm de vir em pares. Os próprios férmions se conservam, de modo que você deve contrabalançar todos os férmions produzidos, assim como deve contrabalançar toda carga elétrica produzida. Cada férmion deve ser acompanhado por uma antipartícula apropriada.

— O que vem a ser uma antipartícula? Dorothy perguntou pacientemente.

— Toda partícula tem uma. Uma antipartícula é de certo modo como a própria partícula, mas é tudo que sua companheira não é. Se uma partícula tem carga positiva, a da antipartícula é negativa. Se uma partícula tem estranheza negativa, então a estranheza da antipartícula é positiva.

— E o que é estranheza? perguntou Dorothy, mas o Leão foi em frente, aparentemente sem ouvi-la.

— A partícula e a antipartícula são gêmeas, mas não gêmeas idênticas. Têm exatamente a mesma massa, por exemplo, mas sob outros aspectos cada uma fornece o que o outra não faz, e podem cancelar as propriedades uma da outra. Podem ser criadas juntas se houver energia suficiente disponível, assim como pode ocorrer com os bósons.

Durante esse discurso, outras colisões entre partículas que chegavam haviam aparecido na tela. Ficava claro que as trajetórias de várias das partículas resultantes eram nitidamente curvas, algumas de maneira muito mais óbvia que outras.

— Isto é o campo magnético, proclamou o Detector orgulhosamente, ainda que de maneira um tanto enigmática. — Não foi à toa que pus todo aquele ferro em torno de meu detector, entendem? É um magneto e produz um campo magnético forte no meio da turma toda. Toda partícula carregada vai se curvar no campo, ah, vai. Cada uma segue uma trajetória curva. Quanto menor é o momento, mais curva é a trajetória. Aquela ali... — acrescentou, apontando uma linha brilhante na tela que se curvara inteiramente sobre si mesma. — Aquela ali não tem quase momento nenhum. As que têm realmente *bastante momento* dão a impressão de estar seguindo reto, mas de fato não o fazem exatamente. O que ocorre é que quando elas têm realmente um momento elevado, o campo magnético não é capaz de forçar muito sua curvatura.

Exatamente nesse instante algo sensacional ocorreu no detector. Na tela, explodiu um grande chuveiro de partículas, concentradas em vários jatos distintos. A coisa aconteceu tão depressa que ninguém pôde ter muita certeza, mas parecia que cada jato de partículas explodira a partir de um ponto ligeiramente diferente.

— Que foi isso? Dorothy perguntou.

— Esse foi um evento raro. — Desta vez quem lhe respondeu foi o Centauro, que estava acostumado a explicar coisas desse tipo a grupos de visitantes. — Vocês viram, fugazmente, a produção e o decaimento de uma partícula inusitada e massiva. Ela se dividiu num grande número de outras, e em seguida estas por sua vez reverteram a um punhado de partículas mais comuns, píons e outras do tipo. Algo de novo e maravilhoso veio ao mundo, permaneceu por um breve instante e depois se desvaneceu novamente, transformando-se no conhecido e no banal.



— Foi tão rápido que não pude realmente ver o que aconteceu. Que pena que não tenhamos podido conservar isso por um pouco mais de tempo! lamentou a garota. — Se pelo menos houvesse alguma maneira de preservá-lo.[3] É provável que aconteça de novo logo?

— Não se pode realmente saber. Essas ocorrências são inteiramente aleatórias e imprevisíveis. Às vezes se passa um longo tempo antes que se repitam; às vezes, um outro evento desses acontece quase imediatamente.

Mal o Centauro acabara de falar, outra explosão sensacional de partículas emergiu violentamente através da tela. Desta vez, no entanto, a imagem não empalideceu. Em vez disso, a porção central da figura *desprendeu-se* da tela. Veio esvoaçando como uma folha de papel na direção de suas cabeças. Todos se viraram para acompanhar seu progresso e viram que estava tomando a direção de uma moça que havia aparecido atrás do grupo. Ela usava óculos severos de secretária e exibia um penteado inusitado. Mais precisamente, tinha um *cabelo* inusitado. Brotando de sua cabeça, havia uma coleção de serpentes finas mas ativas, que se entrelaçavam uma com as outras e se contorciam sibilando. Antes mesmo de alguém falar, o Centauro percebeu que uma apresentação era necessária.

— Quero que conheçam Zola. Ela é uma Górgona do Ensaio Científico e trabalha com publicações. Sabem como o olhar de Medusa, a Górgona original, transformava tudo em pedra? No caso de Zola aqui, tudo quanto ela observa converte-se em ensaio e, subseqüentemente, é publicado na literatura técnica. Tenham cuidado para não cruzar seu olhar com o dela, ou poderiam se ver reduzidos a nada mais que um caractere numa página impressa.

A Górgona foi até uma mesinha próxima em que havia várias máquinas de escrever. Sentou-se, e suas indisciplinadas serpentes prontamente se desvencilharam e se combinaram num padrão de fluente cooperação à medida que cada uma pairava sobre o teclado de uma ou outra das máquinas de escrever e se punha a datilografar com incrível velocidade. Páginas de texto saltavam dos rolos das máquinas e se juntavam às ilustrações que ainda estavam flutuando em direção a ela a partir do detector para formar publicações completas. Estas seguiam flutuando através da caverna e penetravam num túnel lateral.

— Preciso ver para onde estão indo! exclamou Dorothy e correu pelo túnel atrás dos ensaios. Os outros não tiveram alternativa senão segui-la.

Era como estar numa espécie de tempestade de neve. O túnel estava cheio de uma nevasca regular de ensaios, tão numerosas eram as publicações lançadas

3. Na prática usual, os computadores deveriam registrar todos os eventos exibidos ao longo de um experimento, de modo que não há possibilidade de um se desvanecer sem ser notado, como ocorre aqui.

ao mundo. Imersa no meio disso estava uma figura desvairada que vestia um traje de corrida e carregava uma enorme rede de caçar borboletas. Saltava e se contorcia entre as publicações, movendo rapidamente sua rede para um lado e para outro no ar apinhado. Em muitos casos, a malha da rede passava direto através das páginas, sem apanhar nenhuma. De vez em quando, contudo, a rede capturava alguma coisa dos textos. Um grão de informação valiosa permanecia em sua rede, apreendida da saraivada de ensaios. Sempre que isso acontecia, a figura extraía o tesouro da rede com grande satisfação e o metia numa sacola de couro que trazia a tiracolo.

Subitamente, alertado pelo som da aproximação do grupo, interrompeu seu incessante saltitar e se virou para falar com eles.

8 O Campo da Trama de Luz

O grupo de companheiros caminhou até aquele estranho enquanto ele permanecia quieto, observando-os, agarrado à sua cesta de caçar borboletas de maneira quase desafiadora. Agora que podiam vê-lo com clareza, revelou-se um homem baixo, idoso, com cabeça calva e suíças. Era obviamente corpulento demais para a vigorosa atividade que eles tinham testemunhado.

— Olá! — Dorothy dirigiu-se a ele de maneira afável. — Não pudemos deixar de nos perguntar o que estava fazendo.

— Bem, de fato... — ele começou, hesitante. — Estou colecionando. É isto — continuou, com mais confiança. — Colecionando partículas, é isto. Sou uma espécie de colecionador, sabem, um hadronologista.

— Pode me dizer o que é um hadronologista? Dorothy cochichou lateralmente para o Leão. Tinha certeza absoluta de que ele teria uma resposta. — Alguém que coleciona hádrons, foi a resposta surpreendentemente breve do Leão. — Mas então o que é um hádron? sussurrou a garota, impaciente. — É uma partícula que sofre a interação forte. O hádrons são afetados pelas forças fortes, ao passo que os léptons são totalmente indiferentes a elas. — Ah!

Hádrons e léptons

As partículas elementares se dividem em hádrons e léptons. Os hádrons são afetados pela interação forte. Os léptons, não.

Isto é essencialmente tudo que há para ser dito.

Seu novo conhecido estivera esperando pacientemente durante essa troca de cochichos. Quando ela terminou, ele ergueu sua sacola. A um exame mais atento eles puderam ver que se tratava de uma espécie de escrivaninha portátil com gavetas rasas.

— Gostaria de ver minha coleção de hádrons? ele perguntou um tanto envergonhado. E, sem esperar resposta, começou a abrir gaveta após gaveta. Eram todas muito rasas e cada uma exibia um arranjo de partículas em um ou outro de dois padrões diferentes. Uma opção que ocorria freqüentemente era uma disposição hexagonal com duas partículas no centro, dando um total de oito partículas. O arranjo alternativo, que estava menos bem representado, era uma disposição triangular com quatro partículas ao longo da fileira de cima e uma a menos em cada uma das fileiras inferiores, num total de dez partículas.

— Que acham dos meus octetos e decupletos? perguntou-lhes seu novo conhecido. — As partículas se encaixam naturalmente nessas categorias quando as classificamos numa seqüência em termos de carga elétrica e estranheza. As diferentes bandejas contêm partículas com spin diferente e, é claro, algumas são bárions e outras são mésons.

— O que é estranheza? perguntou Dorothy, mas novamente não obteve resposta, pois o colecionador continuou falando sobre seu hobby. Ela decidira que não se daria ao trabalho de perguntar sobre bárions e mésons, mas rapidamente descobriu que nem precisava fazê-lo.

— Alguns hádrons são bósons. São chamados de mésons e se arranjam em octetos. Outros hádrons são férmions e são chamados de bárions. Podem ser encontrados em octetos ou decupletos. Um dos bárions octetos, este aqui... — acrescentou, abrindo uma gaveta para mostrar mais um grupo de oito partículas. — Este contém os primeiros membros de minha coleção. São o próton e o nêutron. O próton, em particular, é conhecido há muito tempo, porque forma por si só o núcleo do hidrogênio. Este aqui está tão conservado quanto no dia em que iniciei minha coleção, muitos anos atrás. Pode acabar por decair, mas não antes de mais 10^{33} anos, aproximadamente.

— Quanto tempo é isso? a menina perguntou curiosamente.

— Quanto tempo é 10^{33} anos? Bem, se você considerar a duração de um segundo comparada com o tempo de vida do Universo, o tempo de vida do Universo está para... Hum... Seja como for, é um tempo muito longo. Vou morrer muito antes.[1]

— Você coleciona somente hádrons? perguntou Dorothy para mudar de assunto.

— Ah sim! Que mais existe, afinal de contas? Há um ou dois léptons, posso lhe garantir. Léptons são partículas que *não* sofrem a interação forte, acrescen-

1. O que o hadronologista está tentando dizer é que entre 10^{33} anos e o tempo de vida do Universo existe aproximadamente a mesma relação que entre esta última e um segundo. Você consegue visualizar isso? Eu também não! Como o homem diz, é um tempo muito longo.

tou à guisa de explicação, mas só há poucos deles. Tem o fóton, é claro, mas só há um tipo dele. Não, tem de ser hádrons. Há centenas deles. Você deveria ver a coleção na Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras).

— Isso é um coisa que gostaríamos de lhe perguntar, ela atalhou rapidamente, agora que o assunto viera à baila. — Por coincidência, estamos querendo visitá-la. Como poderíamos ir daqui até lá?

— Basta que sigam este corredor e ele os levará a um largo túnel que, por sua vez, leva ao portão de saída do Reino do Cern. A Estrada dos Tijolos passa em frente a esse portão e, se vocês seguirem por ela, chegarão diretamente à cidade.

Agradeceram e se puseram a caminho a toda pressa. O trajeto era como ele dissera. Logo se viram fora das cavernas interligadas do Reino do Cern e caminhando novamente, sob céu aberto, pela Estrada dos Tijolos. A região era muito plana e podiam de fato ver, à distância, as muralhas e torres da cidade.

— Gostaria de saber porque é chamada de a Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras), Dorothy pensou alto. — Parece ser completamente sem cor, pelo que posso ver daqui.

Antes que alguém tentasse continuar essa conversa, chegaram a um lugar em que a Estrada dos Tijolos entrava numa vasta campina. Seguia através dela na forma de uma mera trilha na grama, e a seu lado viram um cartaz pregado num poste. Dizia:

Você está entrando agora
num campo eletromagnético.
Perigo grave de fótons virtuais.
Foram avisados!
assinado EM

— Fótons! Alguém não me disse que os fótons são simplesmente luz? Nesse caso, não há o que temer a respeito deles. Não vejo como a luz poderia nos fazer mal. Vamos logo, vamos entrar na cidade.

— Bem, não tenho tanta certeza assim..., começou o Leão, de maneira bastante atípica. Mas a essa altura os outros já havia se adiantado pela trilha, e ele se apressou em segui-los.

Ao caminhar através da campina, nossa heroína olhou para a grama sob seus pés e notou que uma espécie de malha cintilante a cobria. Observou isso exatamente quando estava prestes a dar um passo à frente, e quando tentou erguer o pé ele ficou preso no chão, de maneira firme e completamente inesperada. Perdendo o equilíbrio, ela tropeçou e caiu e, quando seus braços tocaram o solo, ficaram presos também. Dorothy se viu estatelada no chão e incapaz de

mover seus membros um centímetro sequer. Era como se estivessem sendo firmemente atados por liames de aço.

Tudo que conseguia fazer era olhar para um lado e para o outro, e pôde ver que seus companheiros estavam no mesmo impasse. O Sabichão de Lata estava espalhado como se tivesse sido soldado no chão. O Espantalho dava a impressão de que seus membros recheados de palha haviam sido costurados no solo. No momento em que caíam, o Leão exclamara: — Fótons virtuais, eu deveria... — e depois silenciara. Aquilo pareceu a Dorothy ainda mais espantoso que sua presente situação, e ela fez um esforço para virar a cabeça na direção do Leão. Quando conseguiu vê-lo, pôde entender porque calara. Não só seus membros estavam presos na armadilha como seu queixo estava também grudado à malha cintilante, tão firmemente preso que ele se via incapaz de pronunciar uma palavra. Ao lado de sua pata, com que o estivera segurando antes de ser derrubado, estava um livro. Trazia o título *Nossas ligações são leves*, de Ivo C. Leão.

A menina pensou no que deveria fazer. Na realidade, não parecia haver muito sentido em pensar sobre isso, porque não estava em condições de *fazer* nada. Olhou pela campina e viu, a alguma distância, mas se aproximando rapidamente, uma figura alta e ágil. Reconheceu o Acrobata Ajustador, com quem se encontrara anteriormente, pouco depois de conhecer o Sabichão de Lata. Ele estava agora avançando, aparentemente sem dificuldade, pelo campo traiçoeiro. Seu modo de avançar era peculiar. Às vezes se deslocava com uma espécie de



movimento saltitante, às vezes dava uns saltos-mortais ou fazia outras acrobacias, e às vezes dava pulos altos no ar. Os dedos dos seus pés cintilavam enquanto deslizava pela rede de fótons que havia capturado Dorothy e seus amigos. O Acrobata parecia de fato lépido como um cometa, embora houvesse a questão de que *não havia* luz em seus pés — ele conseguia evitar todos os fótons que tinham derrubado e capturado os outros. Fosse como fosse, continuava avançando sem ser capturado em momento algum, e logo chegou onde estavam.

— Olá, saudou animadamente. — Parecem não estar em posição lá muito confortável. Gostariam que os ajudasse a levantar?

Três dos companheiros deram de imediato seu entusiástico assentimento. O Leão não foi capaz de fazê-lo, porque não tinha condições de falar, mas não deixou de bater a cauda no chão uma vez. Provavelmente pretendia batê-la mais vezes, mas da primeira vez que a cauda pousou, ficou firmemente presa também.

De algum modo, e com surpreendente facilidade, o Acrobata os libertou e os ajudou a se pôr de pé.

— Como consegue fazer isto? todos lhe perguntaram.

— É apenas uma questão de estar bem ajustado. Sou o Acrobata Ajustador, e em geral consigo me ajustar a qualquer circunstância. Vocês, no entanto, não têm como escapar à ligação eletromagnética, produzida por sua interação com os fótons virtuais neste campo de luz. Talvez fosse melhor que Não Pisassem na Grama. — Enquanto falava, ele os havia levado, sem que ninguém realmente percebesse (exceto talvez o Espantalho) para uma área livre da Trama de Luz. Ali, algumas barracas e tendas se espalhavam de maneira aleatória.

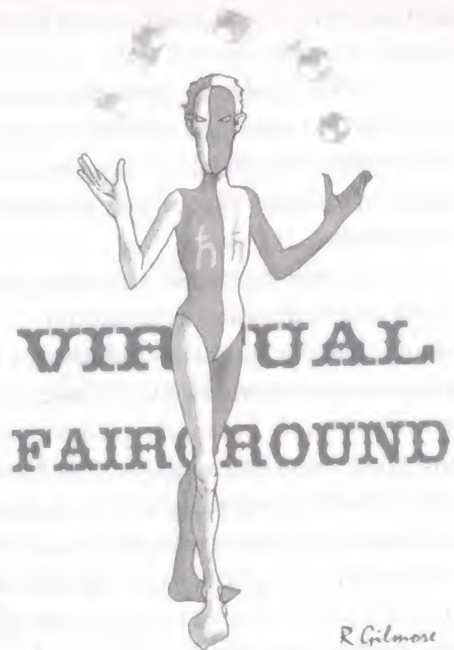
— Este é o Parque Virtual de Exposição e Troca de Fótons. Serve como uma exposição de emissão e troca de partículas virtuais. Um parque de diversões de fótons, em que celebramos o papel desempenhado pelas partículas virtuais na sua realidade.

— Que são partículas virtuais? perguntou Dorothy. Estava meio esperando ser ignorada, como fora recentemente, mas o Acrobata respondeu, embora de maneira um tanto enigmática.

— São partículas que vivem acima das próprias posses. Enquanto falava, começou a fazer malabarismo com vários objetos. A menina não entendeu muito bem de onde esses objetos tinham saído, mas o viu jogar três deles de uma mão para a outra — com a diferença de que agora via que na realidade eram quatro. Não, havia na verdade seis deles, não, três, não, dois, não, quatro. O número de objetos que o Acrobata jogava estava sempre mudando enquanto ela olhava.

— Você é um feiticeiro? ela perguntou. Parecia ser a única explicação possível.

— Não, isto não é um truque. Estes são bósons e o número deles *está* mudando. Não tenho a energia para criar a massa deles. Esta é a massa em repouso. A maioria das partículas possui essa massa pessoal intrínseca, mesmo quando não está em movimento, e essa é uma das características que faz delas o que são. Como não tenho a energia, não posso criar partículas *reais* como você viu acontecer no Cern. As partículas podem, no entanto, *furtar* sua própria existência. Falamos antes sobre o Princípio de Incerteza, que relaciona momento e posição. Eu lhes expliquei como, esmagando uma partícula num volume pequeno podemos obter seu momento, pois não se pode ter uma dispersão de momento a menos que se tenha momento. A mesma coisa se aplica a tempo e energia. A localização no tempo resulta numa dispersão de energia, energia que de outra maneira não estaria ali. As partículas podem furtar energia do Universo, mas não são capazes de conservá-la por muito tempo.



Partículas virtuais e a relação tempo-energia

Assim com há um Princípio de Incerteza para posição e momento, há também um para dispersão no tempo, Δt, e dispersão em energia, ΔE

$$\Delta E \, \Delta t = \frac{\hbar}{2}$$

Como antes, a incerteza pode ser maior que isto, porque sempre se pode estar *mais* incerto sobre algo. Esta equação dá a relação entre a *dispersão* irredutível do tempo e da energia. Num prazo curto, a energia não é bem definida. Para um tempo suficientemente curto, a indefinição na energia pode ser suficiente para permitir a existência da massa de repouso de uma partícula. Essas partículas podem literalmente "vir do nada", embora

apenas para uma vida breve. São chamadas virtuais, mas são parte essencial de nossa realidade e fornecem todas as interações que mantêm o mundo coeso.

. . . .

— Não se deixe confundir pelos nomes *real* e *virtual* para partículas,[2] o Acrobata Ajustador acrescentou severamente. — As partículas virtuais são em tudo e por tudo uma parte tão importante da sua realidade física quanto as chamadas partículas reais. Trata-se apenas de uma questão de sua contabilidade energética.

— Tenho certeza de que já lhes disseram que a energia se conserva: que ela pode mudar de uma forma para outra, mas a quantidade total de energia nunca muda. Isso é sem dúvida verdadeiro a longo prazo. Não se pode simplesmente criar energia. As leis da física clássica dizem que não se pode ter mais energia do que havia antes. Na escala quântica, no entanto, a escala de $\hbar$, *é possível furtar* um pouquinho de energia *por um breve tempo*, embora logo seja preciso devolvê-la. Quanto mais energia se toma, mais depressa é preciso repô-la. Durante esses breves períodos, a energia furtada pode ser usada para fazer matéria: bósons, ou até pares de partículas-antipartículas. Como a maioria das partículas tem massa, e como massa é energia, essas partículas não furtam simplesmente energia. Furtam sua própria existência. Essas são as *partículas virtuais*, que existem graças ao "Princípio de Incerteza". Vivem, total ou parcialmente, de energia furtada — de energia furtada do próprio Universo.

— Puxa! disse Dorothy. — Mas se a existência delas é tão precária e tem de terminar quando sua energia se dissipa, com certeza essas partículas podem afetar pouco o esquema das coisas.

— Errado! gritou bem alto o Acrobata, com certa falta de tato. — Seria difícil você estar mais errada. Diga-me, achou difícil se mover quando repousava pacificamente lá na campina?

— Difícil! exclamou Dorothy. — Era impossível. Estava tão incapaz de me mover como se estivesse presa com tiras de aço. Não entendo como fótons podem ter esse efeito. São apenas luz, não é?

2. Como a maior parte dos termos técnicos, *real* e *virtual* podem suscitar confusão. Uma partícula real tem toda a energia de que precisa para um tempo tão longo quanto queira. As partículas virtuais têm uma espécie de déficit de energia. Não possuem a energia correta para abastecer parte ou a totalidade de sua massa e diz-se que estão "fora da camada de massa". Para tornar as coisas ainda mais confusas, muitas partículas aparentemente reais podem ser um bocadinho virtuais.

— É verdade, são. Mas se você estivesse presa por tiras de aço, que acha que estaria de fato lhe prendendo? Ora, luz da mesma maneira! Em qualquer material, inclusive o aço, forças elétricas ligam os átomos uns aos outros, e forças elétricas são produzidas pela *troca* de fótons. Estes aqui são fótons virtuais, não resta dúvida, mas continuam sendo fótons apesar disso. Um elétron num átomo pode absorver fótons que foram emitidos por um elétron em outro. Fótons virtuais podem carregar tanto energia quanto momento. Se um elétron absorve um fóton que foi emitido por outro elétron, a energia ou o momento carregados pelo fóton se transfere do primeiro elétron para o segundo. O que uma força faz é transferir momento para qualquer coisa sobre a qual ela atue. Inversamente, quando você transfere momento, está exercendo uma força. Os fótons produziram uma interação entre os átomos. Todas as forças, todas a interações, são causadas pela troca de algum tipo de partícula virtual. Todas as forças elétricas são devidas à troca de fótons virtuais. Suas barras de aço não são mantidas coesas por outra coisa senão o material de que é feito o luar.

— Essa história só pode ser conversa fiada e absurda! exclamou a menina acaloradamente. — Não podemos sentir um raio de luar ou qualquer luz que caia sobre nós, a menos, é claro, quanto a luz forte do sol nos aquece. Com certeza podemos sentir uma barra de ferro de maneira completamente diferente. A luz é inofensiva; uma barra de ferro pode não ser.

— É uma questão de grau, respondeu o Acrobata, que a esta altura estava fazendo malabarismo com fótons tão depressa que parecia haver centenas deles jogados para lá e para cá. — Talvez você pensasse de outro modo sobre a inocuidade da luz se estivesse dento de uma estrela que acaba de se tornar nova. Você pode ignorar alguns fótons com segurança, mas uma rajada violenta deles poderia torrá-la. Os fótons são emitidos por cargas elétricas e, na prática, isso geralmente significa elétrons. Fótons reais, do tipo que se desloca por aí na forma da luz que você vê, só aparecem quando elétrons estão *fazendo alguma coisa* que muda sua energia — quando se transferem de um estado para outro no átomo, ou mesmo quando saracoteiam para cá e para lá na antena de um radiotransmissor. Fótons virtuais também são emitidos pela carga presente em elétrons, mas, nesse caso, os elétrons não têm de lhes fornecer necessariamente energia e não têm de estar *fazendo nada em particular*. Há uma enorme quantidade de elétrons no mundo, e a maioria deles está de certo modo num estado não-perturbado, de maneira que podem e de fato emitem fótons virtuais, mas não reais. Você poderia esperar que houvesse uma imensa quantidade de fótons virtuais por aí, e há mesmo. O fluxo, a intensidade de fótons virtuais presente, é provavelmente maior que a intensidade de fótons reais presentes na detonação de uma estrela que explode. No todo, eles não carregam a energia livre que torna uma estrela

que explode tão destrutiva, mas aquilo que fazem, fazem-no intensamente, e isso inclui produzir a ligação poderosa dos átomos dentro do ferro "sólido.

Nessa altura o Acrobata pareceu perceber que uma demonstração mais concreta se impunha. — Se quiserem ver uma ilustração da diversidade da troca de partículas, experimentem aquela barraca ali. Indicou uma tenda vistosamente listrada com um cartaz na frente que dizia:

O Nunca-Nunca!
Um jogo de dívida *infinita*
para duas ou mais partículas.
Aposte tudo que tiver
– e o que não tiver

Use sua conta corrente* para tomar emprestado
o máximo de energia com a máxima criatividade

— Talvez isto lhes pareça instrutivo, acrescentou ao introduzi-los na barraca. No centro da tenda viram uma mesa, e em cada uma das duas cabeceiras estava pousada uma partícula carregada com um jogador sentado ao lado. Um alto placar se erguia atrás de cada participante.

— O jogo já vai começar, explicou o Acrobata. — Os dois concorrentes controlam a troca de partículas virtuais entre as cargas, e o placar acompanha a energia que tomaram emprestada para esse fim. Veja, um jogador acaba de fazer um movimento bastante convencional.

O jogador havia começado com a cautelosa emissão de um fóton de longo alcance. Este tinha uma energia muito baixa, e por isso podia existir tempo o suficiente para se distanciar bastante da carga de origem. A energia investida nisso mal fora registrada no marcador. Na superfície escorregadia e sutilmente luminescente da mesa, apareceu uma linha ondulada entre as duas cargas, a notação convencional para a troca de um único fóton. O outro jogador respondeu com um fóton de curto alcance e energia muito mais elevada. A energia maior tornou o tempo concedido a ela curto demais para que atingisse a outra partícula, e o que fez foi contribuir para a nuvem de partículas virtuais que cerca qualquer carga. Essa nuvem foi se tornando constantemente mais densa à medida que se aproximava da carga de sua origem, para a qual bósons virtuais de energias cada

*No original, *charge accounts*, literalmente "contas de carga". (N.R.T.)

vez maiores podiam contribuir. Na mesa, o fóton aparecia como uma linha ondulada que retornava para a mesma carga que a havia emitido.[3]

O primeiro jogador aumentou então a parada oferecendo duas partículas ao mesmo tempo, e o segundo respondeu com três. Cada movimento era acompanhado pela adição de mais linhas onduladas ao diagrama na mesa e por um ligeiro aumento dos totais no placar. Essa escalada regular continuou por algum tempo até que um dos jogadores teve um lampejo de inspiração.

— Ei! ele exclamou. — Sabe que só temos permissão para trocar bósons?

— Sei, foi a resposta cautelosa de seu oponente.

— Pois muito bem. Se eu tiver um par partícula-antipartícula, isso seria afinal o mesmo que um bóson, não seria?

— Seria. E daí?, perguntou ainda cauteloso.

— Nesse caso eu poderia trocar um par partícula-antipartícula. Digamos um elétron e um pósitron.

— Mas você sabe que somente *fótons* vão se ligar com carga elétrica. Sua carga tem de emitir fótons e mais nada. Isso é *tudo* que ela pode fazer.

— Sim, mas ouça isto. Elétrons e pósitrons têm carga elétrica. Elétrons têm carga negativa. Pósitrons têm carga positiva. Ambos são excelentes para se conectar com fótons. Sendo assim, o que posso fazer é o seguinte: vou enviar um fóton virtual exatamente como estivemos fazendo até agora. *Esse* fóton pode então se converter num par virtual elétron-pósitron, sabe-se lá onde. Eles vão se *reconverter* num fóton virtual, e esse fóton será absorvido pela sua carga. Que acha disto?

— Parece complicado.

— É, tem razão. Vai ser uma perturbação muito grande. Acho que não vou me dar a esse trabalho.

— Não, essa não é uma opção. Você conhece a regra: "Tudo que é possível é compulsório". Se você *puder* incluir pares de partículas-antipartículas, tem de fazê-lo. Não lhe resta outra escolha, meu amigo.

Assim, o jogador de fato enviou um fóton que se converteu num par elétron-pósitron e em seguida de novo num fóton antes de ser absorvido pela carga do outro. Essa troca foi devidamente registrada pelo diagrama no tampo da mesa, com as partículas e antipartículas sendo mostradas como um laço apertado de linhas sólidas entre as linhas onduladas que designavam fótons.

Dali em diante os dois jogadores jogaram a cautela para o alto e trocaram construtos ainda mais complicados. Tinham pares elétron-pósitron dos quais as

3. Esses diagramas, que fornecem uma maneira conveniente de representar a troca de partículas virtuais, são conhecidos como diagramas de Feynman.

partículas virtuais por sua vez emitiam seus próprios fótons virtuais. Podiam fazer isso legitimamente porque eles tinham cargas elétricas. Algumas vezes esses fótons eram absorvidos por uma das cargas originais, outras pela carga da outra partícula no par. Ocasionalmente os novos fótons se convertiam eles próprios em elétron e pósitron. Dorothy observou que de vez em quando, mas só muito perto da primeira carga, um fóton se convertia num par próton-antipróton. Estes eram muito pesados e arrancavam um *bocado* de energia do cômputo, de modo que não podiam ir nem um pouco longe. A situação estava ficando *realmente* complexa.

Ao longo de toda essa frenética escalada da situação, o placar mostrava um crescente gasto, ou melhor, empréstimo de energia. Essa energia ia alimentar uma crescente variedade de partículas que formavam uma nuvem em torno de cada carga, além de algumas poucas que conseguiam atravessar até a outra partícula. Uma segunda coluna no placar, que Dorothy não notara de início, mostrava um movimento constante, e mais uma vez crescente, na *carga* observável das duas partículas iniciais, porque agora havia partículas carregadas nas nuvens virtuais que as envolviam. A energia que havia sido investida no campo ou nuvem de fótons e outras partículas virtuais que cercavam cada carga estava agora crescendo numa taxa incrível e cada vez maior. Os marcadores atingiram o topo dos altos placares que se erguiam junto a cada jogador, e que *por sua vez* começaram a crescer e crescer sem parar. Cresceram até o topo da tenda. Sem pausa, rasgaram a lona. O grupo de companheiros correu para fora da barraca e viu que os placares continuavam subindo rumo ao céu. Seus topos ficavam cada vez mais altos e distantes, desaparecendo completamente de vista.

— Puxa! exclamou Dorothy. — Quando vão parar de crescer?

— Nunca, respondeu o Acrobata. — Não há limite para a energia envolvida. A nuvem de partículas virtuais que envolve as cargas é infinitamente intricada e guarda uma quantidade infinita de energia. As amplitudes para os processos mais complexos são menores do que para uma única troca de fótons, é verdade, e a probabilidade desses processos complexos é pequena, mas as opções disponíveis são *tantas* que a energia total envolvida simplesmente continua a crescer. Ela é muito maior que a energia da massa da própria partícula carregada. A grande extensão de amplitudes possíveis é ilustrada de outra maneira pelo show que acontece ali.

Apontou uma pequena tenda com um cartaz que dizia *Dança dos 7 Véus.* Diante desse cartaz, uma carga espessamente oculta por véus gravitava de maneira erótica. É impossível descrever ou mesmo imaginar como o fazia, mas aquilo certamente chamou a atenção dos companheiros de Dorothy. Com grande deliberação a carga lançou fora o véu mais exterior. Este era fino e tênue, um único fóton virtual de baixa energia que se espalhara em torno dela. Mais véus se seguiram. Alguns eram finos, trocas de um único fóton. Alguns eram mais substanciais, dois ou mais fótons simultaneamente. Vez por outra caía um véu exótico, enfeitado com um par de partículas carregadas.

Ocorreu a Dorothy que àquela altura já devia ter havido mais de sete véus. Deu uma olhada para o cartaz e viu que ele agora dizia *Dança dos 77 Véus.* Mas o espetáculo continuava. Véu após véu era descartado. Quando começaram a provir de regiões mais próximas da carga nua,[4] os véus tornaram-se mais intricados, pesadamente adornados com pares de partículas-antipartículas a que se juntavam inúmeras carreiras de finas costuras de fótons. Era rico, era exótico, e parecia não ter fim. Dorothy desviou os olhos da estonteante exibição por um momento e olhou de novo para o cartaz. Agora ele dizia *Dança dos 777 Véus.*

— Será que isto não tem fim? perguntou retoricamente.

— Não, não tem. Há um sucessão infindável de amplitudes para emissão de partículas virtuais pela carga. À medida que você se aproxima do núcleo, elas se tornam cada vez mais intricadas e exóticas, com energias cada vez maiores envolvidas. A energia armazenada no campo e a resultante adição à massa da partícula carregada são infinitas.

— Como isso é possível? exclamou Dorothy com ponderação. — A massa da partícula certamente não é infinita. Você me disse que os elétrons não eram pesados em absoluto.

— Não, não são. Mas essa é a massa que você vê a partir de *fora* do elétron, e não é a mesma coisa que a massa da partícula básica. Você viu anteriormente que a massa do núcleo era ligeiramente menor do que a soma das massas dos prótons e nêutrons dentro dele. No caso de um elétron carregado, você *não sabe* que massa o elétron teria se ele não tivesse a carga elétrica que fornece o campo das partículas virtuais. Você *nunca* vê um elétron sem sua carga elétrica. A massa bruta de um elétron nu pode estar enterrada muito abaixo da massa que você observa. Você não tem razão para dizer coisa diferente.

— Mas você disse que a energia das partículas virtuais era infinita! protestou Dorothy. — A massa do elétron não pode ser *infinitamente* menor do que o pequeno valor que você vê!

— Por que não? Como sabe o que a massa poderia ser? É como falar de altura acima do nível do solo. O potencial gravitacional — a energia que você deve fornecer para erguer um objeto no ar — depende da altura dele no campo gravitacional da Terra. Mas qual é essa altura? Você poderia dizer que é a distância

4. Sinto muito, mas este é o termo técnico para isso.



acima do nível do solo, acima do nível mais baixo em que o objeto poderia cair. Mas, ora, que nível é esse?

— Bem, isto é bastante claro, disse Dorothy, contemplando a planície horizontal, forrada de capim, que se estendia por todo o caminho até os portões da Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras) à distância. — É esse o nível do solo aqui. Isto é o mais baixo que você pode cair.

— Será mesmo? Dê uma olhada para trás de você, mas com cuidado!

Todos olharam e descobriram que, ali onde tinham certeza de haver um terreno plano que se estendia em todas as direções, estava de fato um poço excessivamente fundo no terreno, à beira do qual se encontravam. Poucos metros apenas atrás deles, a terra despencava com uma brusquidão de dar náusea. Descia, descia, descia; o abismo parecia afundar-se sem limite. Quando se aproximaram (com cuidado) da borda e olharam para as remotas profundezas desse incrível poço, não puderam ver nenhum fundo. Não havia nada visível, exceto talvez uma possibilidade de estrelas ao longe.

— Então a que distância poderia cair agora? Onde fica o "nível do solo" em que você pode dizer que não há nenhuma energia potencial devida à gravidade?

— Apanhou um punhado de terra e jogou-a na fenda abismal. Todos esperaram que desaparecesse sem deixar traço nas profundezas insondáveis abaixo, mas, para seu pasmo, o que ocorreu foi que a terra se espalhou sobre o topo da abertura e vedou-a à vista deles. Não havia como dizer que o poço havia estado ali.

— Isso é nível fundamental, observou o Acrobata. — Agora vocês não têm razão nenhuma para acreditar em outra coisa. Tanto quanto podem saber, o solo se estende niveladamente por toda a volta aqui, e não há razão para suspeitar, ou para temer, que existam quaisquer profundidades escondidas embaixo. Se elas existem, estão escondidas. Passa-se o mesmo com a massa do elétron. O que pode ser a massa do elétron nu, vocês não sabem. Nem precisam realmente se preocupar com isso. O elétron pode ter uma dívida energética infinita que está compensando um valor infinito para sua massa. Mesmo que seja assim, vocês nunca irão encontrar um elétron que não esteja discretamente vestido com seu pleno complemento de carga elétrica. A massa "vestida" é a única massa com que precisam se preocupar, ele disse com firmeza.

— O único elétron que jamais verão é o elétron vestido, repetiu. Qualquer elétron — e aliás, qualquer carga — é envolto por uma nuvem de fótons virtuais. À distância os fótons são tênues, com pouca energia ou momento. Bem perto da carga que é sua fonte, a nuvem é mais densa. Ela armazena mais energia e carga elétrica também, na forma de pares equilibrados de partículas e antipartículas virtuais. Quando outra carga entra nessa nuvem virtual, ela pode absorver as partículas e receber a energia e o momento que elas pediram emprestado. A transferência de momento de uma carga para outra é o efeito da força elétrica, como já disse. A nuvem de fótons virtuais *é* a força. Os fótons são o campo elétrico que envolve a carga, e quando o momento ou energia que possuem por um breve tempo é transferido para outra carga, isso se manifesta como a força exercida pelo campo. Não há nenhum campo e nenhuma força exceto os das partículas virtuais, concluiu o Acrobata. — Até logo, ele acrescentou abruptamente. — Já tive tempo demais. Preciso partir enquanto ainda tenho energia para tanto. Assim dizendo, partiu com um salto-mortal de costas e uma série de acrobacias que o levaram embora através da campina de fótons.

. . . .

Renormalização

O número de conjuntos possíveis de partículas virtuais é infinito. Como são *possíveis*, são num certo sentido reais, e a energia (e a carga) associadas a eles revela-se infinita. Ora, energia é massa, e você sabe que os elétrons, por exemplo, não têm massa infinita. Isto parece um paradoxo.

A maneira de resolvê-lo é dizer que, como só conhecemos a massa quando as partículas estão "vestidas" com seus trajes de amplitudes virtuais, podemos estipular *este* como o valor observável e deixar que os valores para a massa e a carga "nuas" sejam o que bem entendem.

Surpreendentemente, quando você faz isto, *tudo* que você calcula dali por diante tem o resultado exatamente correspondente ao observado em experimentos.

. . . .

Deixados por si mesmos, os vários membros do grupo de viajantes olharam em volta. Viram que a Estrada dos Tijolos havia reaparecido, levando para fora da área onde estavam. O caminho seguia para a Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras), que estava agora claramente visível e já não parecia tão distante. Prontamente partiram para lá. Enquanto caminhavam, Dorothy cismava sobre tudo que o Acrobata lhe dissera.

— Acho que posso entender que pedir energia emprestada para lançar uma tal variedade de partículas virtuais pode certamente resultar numa grande dívida de energia. Acho que posso até entender vagamente que a energia no campo elétrico de um elétron poderia modificar a sua massa, porque me disseram que energia é massa. O que não entendo é por que a emissão de partículas virtuais deveria mudar a carga total que uma partícula parece ter, ela anunciou, a ninguém em particular. — Com certeza me disseram que quando uma partícula é emitida, mesmo uma partícula virtual, a carga elétrica se conserva. — Segundo seu costume de tratar qualquer pergunta, por mais implícita ou retórica, como um convite para expor, o Leão respondeu imediatamente.

— É na verdade porque a nuvem de partículas virtuais inclui partículas virtuais carregadas que você pode observar uma carga diferente. Como viu, uma carga elétrica vai emitir fótons virtuais, e estes podem por sua vez produzir pares de partículas virtuais carregadas. Agora, é verdade que a carga é conservada, ele continuou, adotando uma marcha confortável. — A carga total de qualquer par de partículas criado deve sempre chegar a zero. Eles não podem ter nenhuma carga líquida total, mas suas cargas individuais podem estar em posições diferentes e podem afetar o campo elétrico localmente. Considere os elétrons num metal. Eles são livres para se mover de um lado para outro e assim, se houvesse um campo elétrico dentro do metal, os elétrons iriam se mover nesse campo até que os campos produzidos por suas próprias cargas tivessem cancelado o campo que estava originalmente presente. Nessa altura não haveria mais nenhuma força elétrica total sobre os elétrons, e eles iriam permanecer onde estavam. Os elétrons vão sempre se mover para cancelar qualquer campo elétrico *dentro* de um metal. É por isso que você não consegue uma boa recepção telefônica de um telefone celular posto dentro de uma caixa de metal.[5]

Dorothy não tinha telefone celular, mas já ouvira pessoas se queixando desse efeito.

— Esse movimento de elétrons afeta também o campo fora do metal? ela perguntou.

— Perto da superfície, afeta. A uma distância suficiente não produz grande efeito, porque a carga do elétron é equilibrada pelas cargas positivas nos íons que estão fixados na treliça metálica. Os elétrons estão livres para se mover, os íons, não, mas a carga total do metal é zero.

— Então se você se afastar o bastante de um elétron, para um lugar onde não há carga em volta, a carga do elétron não vai ser alterada por quaisquer partículas virtuais carregadas, seja qual for o modo como as cargas possam estar distribuídas.

— Bem, se você pudesse encontrar algum lugar que não tivesse carga, até que você teria razão. Mas você não conseguiria encontrar isso.

— Não vejo por que não! protestou a menina. — Tudo que é preciso fazer é encontrar um lugar onde não haja elétrons. Um vácuo talvez.

— Temo que isso não seja possível. Até um vácuo pode ter um efeito. Por sinal, estamos num bom lugar para demonstrar isso, ele continuou enquanto se viam andando por uma encosta acima. Dorothy notou que o caminho estava se elevando para formar uma espécie de ponte levadiça de tijolos em direção à cidade. De ambos os lados desse caminho elevado estendia-se um fosso, mas não estava cheio de água. Estava cheio de nada. Não é que simplesmente não houvesse água nele e que o fundo fosse claramente visível. Estava cheio de NADA: um grande vazio — uma ausência, ou mesmo uma negação, de matéria e conteúdo. Era o Vácuo.

Examinando esse poço de nada, Dorothy pôde ver dentro do vazio uma espécie de turbilhão fervente. Lembrava um pouco o movimento de ebulição num líquido que começa a ferver. Parecia um poço em que ela vira certa vez uma massa de girinos recém-nascidos a se contorcer. Cada parte dele estava cheia de uma atividade intensa mas não inteiramente discernível.

— O que está acontecendo ali em baixo? perguntou, intrigada.

— Bem, isso é o Vácuo, e dentro dele você vê — ou quase vê — a presença de partículas virtuais de toda sorte.

---

5. É o caso de um automóvel. Carros são caixas de metal com buracos (como o pára-brisa), e a recepção é geralmente pior dentro deles. Os telefones celulares funcionam dentro de carros, mas isso porque os fones são bastante sensíveis e os buracos muito grandes.

O vácuo

Na física quântica, o vácuo não é mais simplesmente *nada*. É bastante movimentado.

As partículas virtuais tomam a energia de que precisam para sua breve existência emprestada das flutuações da energia quântica. Se não há nada além da necessidade de massa para inibir sua existência, elas simplesmente aparecem, efetivamente a partir do nada. Há algumas outras restrições que devem ser obedecidas. Cargas elétricas devem ser conservadas e férmions só podem ser criados juntamente com suas antipartículas.

Até agora consideramos partículas virtuais como emitidas por partículas "reais", mas elas não precisam realmente destas últimas. O vácuo quântico é densamente povoado por intensa efervescência de partículas virtuais, e isso tem efeitos observáveis.

— Mas como pode ser isso? Vocês todos disseram que partículas virtuais são emitidas por cargas, e suponho que posso aceitar isso. Mas se isso é um vácuo, certamente não há cargas ali — nada que possa atuar como uma fonte de tais partículas.

— Inerentemente, talvez não. Mas, se houvesse cargas, elas poderiam emitir fótons virtuais, ou, se houvesse fótons, talvez eles pudessem emitir pares de partículas-antipartículas carregados. As duas coisas são possíveis, sem que nenhum estoque inicial de energia, carga, ou qualquer outra coisa seja necessário. Se alguma coisa é possível, então ela é compulsória, como você sabe. Há amplitudes presentes para todos os tipos de partículas virtuais.

— Isto é um absurdo! disse Dorothy com firmeza.

— Talvez seja. É um pouco parecido com a questão do que nasceu primeiro, o ovo ou a galinha.[6] Continua sendo verdade, no entanto, que o vácuo é povoado por amplitudes de partículas virtuais e que as cargas para aquelas que *são* carregadas podem se separar para produzir uma *polarização do vácuo*. Assim como elétrons e núcleos atômicos podem se separar em qualquer sólido e produzir uma *constante dielétrica* (um fator pelo qual campos elétricos são reduzidos dentro do material), assim também as cargas virtuais no vácuo podem se separar para reduzir a força de um campo elétrico. Classicamente, pensava-se que não havia redução da força do campo num vácuo e que nenhum campo como esse poderia ser medido, mas isso é simplesmente porque o campo está *sempre* no vácuo. Qualquer efeito que o vácuo possa ter é o ponto de partida para as mensurações que você faz, e assim qualquer campo no vácuo não é detectado normalmente.[7]

Dorothy continuava com a impressão de que havia alguma coisa não inteiramente certa em tudo aquilo. Parecia haver algo inerentemente errado em somar dois valores infinitos que iriam se anular mutuamente para dar um resultado bastante pequeno — e ainda por cima esperar que as pessoas acreditassem no que você tinha feito.

— Não sei, disse ela. — Parece tudo tão... Parou nesse ponto, não muito certa de com que aquilo parecia.

— Arbitrário, talvez? sugeriu o Leão. — Talvez lhe pareça que dizer que a carga não vista, nua, do elétron poderia ter um valor, particularmente um valor que é infinito e negativo, é simplesmente varrer a coisa toda para debaixo do tapete, por assim dizer. É possível que imagine que não há meio de confirmar uma noção tão radical e que ela está fadada a ser sempre só um castelo no ar. No entanto, há uma confirmação, pelo menos indireta. Uma vez que você admita que o elétron nu isolado pode de fato ter uma carga infinitamente grande, pode calcular muitas outras propriedades elétricas. Estas se revelam estar de acordo com os valores que se observam em experimentos — e aliás de maneira muito precisa. Então você vê, atribuindo um valor aparentemente de todo improvável a uma quantidade que está, ela própria, oculta a seus olhos, e descobre que se pode com isso obter os números *corretos* para muitas coisas que se *pode* medir. É bastante convincente à sua maneira.

Não houve nenhum debate sobre isso. Até então, não parecera a Dorothy lá muito produtivo discutir com o Leão sobre *o que quer que fosse*. Assim, foi em silêncio que o grupo chegou ao Portão da Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras).

6. A resposta neste caso é o *ovo*. Ele foi posto por algo que ainda não havia se desenvolvido por completo numa galinha.

7. As amplitudes virtuais produzem efeitos mensuráveis. Um deles é o efeito Casimir, que gera uma força fraca entre duas chapas de metal dispostas bem perto uma da outra num vácuo, por causa das amplitudes das partículas entre elas.

9
O Mágico dos Quarks

Dorothy e seus companheiros transpuseram o portão aberto da cidade e olharam à sua volta. Tudo era construído numa escala impressionante e impecavelmente limpo. Imediatamente os companheiros ficaram pasmos com a total ausência de qualquer cor visível, como Dorothy já ficara ao ver a cidade à distância. Havia todos os tons concebíveis de cinza, mas as cores de tudo que olhavam eram completamente neutras.

Onde quer que olhassem, viam ruas que pareciam exatamente iguais, apinhadas de grupos aparentemente idênticos de hádrons. Perguntaram a si mesmos para onde iriam em seguida. Embora as ruas estivessem repletas de hádrons, não conseguiam ver uma única pessoa a quem pudessem pedir uma orientação sobre seu caminho. Quando estavam debatendo seu próximo passo, uma carruagem puxada a cavalo parou na rua junto deles.

— Subam, disse o cocheiro. — Vou levá-los lá.

— Mas não sabe onde queremos ir! Dorothy protestou.

— Querem ver o Mágico, retrucou o cocheiro.

— Como ficou sabendo disso? ela perguntou, surpresa.

— Oh, é fácil. *Todo mundo* que vem aqui deseja ver o Mágico. Vamos embora. Não faz sentido perder tempo.

Subiram na carruagem que, felizmente, era bastante grande e tinha espaço para todos eles, até para o Leão. Logo estavam trotando celeremente pelas ruas. Dorothy ficou intrigada ao perceber que, em contraste com a total falta de cor das demais coisas, o cavalo estava se transformando gradualmente através de uma atraente sucessão de tons de azul, vermelho e finalmente de verde. Em seguida começou o ciclo novamente. Ela perguntou sobre esse comportamento espetacular, embora com uma premonição de que a resposta não seria útil. — Ah! senhorita, o cocheiro deu uma risadinha — esse é o "cavalo de uma cor diferente" de que certamente já ouviu falar.[1]

---

1. Incluí isto sobretudo por nostalgia; é uma piada tirada do filme. A referência a cor pareceu apropriada.

Exatamente nesse momento chegaram à entrada do Palácio do Mágico. Desceram da carruagem com agradecimentos para o cocheiro e ele seguiu em frente, ainda dando risadinhas. Mais uma vez, não havia ninguém nas redondezas a quem pudessem pedir orientação, mas, como estavam de frente para uma única entrada além da qual se estendia um impressionante corredor, a escolha parecia óbvia. Passaram pela entrada e caminharam bastante nervosamente pelo corredor. Isto é, três deles caminharam nervosamente; o Leão, é claro, andou pomposamente, com plena confiança. Juntos, entraram numa grande sala de audiências.

A primeira visão que tiveram desse salão fez com que parassem assombrados assim que transpuseram a porta. Tinha uma enorme extensão de piso e era enormemente alto. Grandes pilares cinza erguiam-se por todos os lados até um remoto teto em arco de um cinza embaciado que aumentava a impressão de distância. A sala parecia ainda maior do que era porque suas paredes curvas tinham um acabamento de espelho enevoado que emitia reflexos distorcidos do espaço em seu interior. Além do círculo de pilares podiam-se entrever formas estranhas e fragmentos remotos de alvenaria que enganavam a vista. Nesse mundo externo percebido além do salão do Mágico, a complexidade embaciada de tudo que estava à vista servia para disfarçar a simples realidade presente ali dentro. No centro da área, flutuava uma roseta de brilho intenso: oito hádrons maciços arranjados no padrão hexagonal que eles haviam visto na amostra do colecionador, mas de estatura aumentada a dimensões prodigiosas. A simetria simples desses hádrons era oculta por muitos reflexos especulares que confundiam a mente com um número excessivo de iterações da ordem básica.

— QUEM SÃO VOCÊS? estrondeou uma voz desencarnada, fazendo eco à volta de toda a câmara.

— Eu sou Dorothy e estes são meus amigos, o Espantalho Observador, o Sabichão de Lata e o Leão Confiante, ela respondeu nervosamente. — Queremos falar com o Mágico dos Quarks.

— EU SOU O MÁGICO. O MÁGICO DOS QUARKS. SENHOR DOS HÁDRONS. MESTRE DAS PARTÍCULAS MAIS FUNDAMENTAIS QUE INTEGRAM NOSSO MUNDO, a voz trovejou por toda parte à volta deles.

— É sobre isso que gostaria de falar com o senhor, Dorothy disse corajosamente. — Gostaria de retornar para o meu mundo, e me disseram que o senhor pode me ajudar. Você acha que...?

— **SILÊNCIO!** urrou a voz desencarnada. O padrão de hádrons que assomava sobre eles mudou no mesmo instante de uma roseta de oito para um agrupamento triangular de dez, tal como fizera antes nas gavetas do colecionador.

Esse número maior de hádrons alcançava uma altura mais elevada e parecia ainda mais ameaçador do que antes a flutuar opressivamente sobre suas cabeças. Os ecos da voz tremenda rolavam em torno da câmara e as próprias paredes pareciam se sacudir. O que *realmente* se sacudiu foi uma cortina que protegia um canto da sala, e Dorothy teve a impressão de ver movimento atrás dela. Foi até lá e afastou a cortina para um canto.

— NÃO DÊ NENHUMA ATENÇÃO AO HOMENZINHO ATRÁS DA CORTINA! bramiu a voz enorme que enchia a sala. Fora exatamente isso que Dorothy encontrara ao afastar a cortina: um homenzinho careca que apertava botões e falava a um microfone suspenso diante de si.

— Quem é o senhor? perguntou.

— SOU O GRANDE E PODEROSO... Mágico dos Quarks, ele concluiu numa vozinha fina, desviando-se do seu microfone para olhar para ela.

— É realmente o Mágico? ela perguntou, incrédula.

— Sim, acho que sim. Sou tudo o que há, com exceção dos quarks, é claro.





Fez um gesto vago na direção de vários pequenos objetos coloridos que se agrupavam em volta dos seus pés no espaço exíguo. Ao mesmo tempo, o grande e variado conjunto de hádrons, que tanto os havia oprimido acima de suas cabeças, desabou no chão e não deixou nada senão um grupo dos mesmos pequeninos quarks coloridos que corriam pelo chão.

Dorothy olhou para sua descoberta com mais atenção. Agora que o podiam ver claramente, o homem se revelava baixo e idoso, de cabeça calva e suíças. Era obviamente corpulento e naquele momento parecia bastante embaraçado. Se não era o colecionador de hádrons que haviam conhecido antes, era seu gêmeo idêntico, embora agora estivesse vestido de maneira mais formal, usando uma sobrecasaca em vez do traje de corrida que tinham visto antes.

— Já não nos conhecemos? ela perguntou. — Não o vi coletando hádrons no Reino do Cern?

— Bem, sim, respondeu o Mágico, parecendo, se isso era possível, ainda mais embaraçado. — É um *hobby* que tenho, colecionar hádrons. Estou sempre à espreita, buscando um ainda mais raro e mais exótico do que os que já tenho na minha coleção. Isso pode lhe parecer um tanto sem sentido, visto que todos os hádrons são apenas, afinal de contas, grupos de quarks. É por isso que enfeito as coisas um pouco aqui. Para fazer com que tudo pareça mais misterioso e exótico, entende?

— Mas eles são todos realmente apenas grupos de quarks? perguntou Dorothy. Não tinha nenhuma razão particular para duvidar da informação, mas algum comentário parecia necessário.

— Oh, sim. Os bárions — que são férmions, você sabe — são feitos de grupos de três quarks. Mésons são bósons fortemente interativos. São combinações de um quark com um antiquark.

. . . .

De como os hádrons são compostos de quarks

O hádrons são aquelas partículas que interagem entre si através da chamada *interação forte*. Há muitos tipos diferentes deles (como é observado no texto), tanto férmions (chamados bárions) quanto bósons (chamados mésons). Todos são construídos a partir de um pequeno número de partículas mais básicas chamadas quarks. Os bárions são combinações de três quarks; os mésons são combinações de um quark e um antiquark.

Não temos conhecimento atualmente de nenhuma partícula mais básica do que os quarks.

. . . .

— Então há também antiquarks?

— De fato há. Cada partícula tem sua antipartícula. Embora em alguns casos elas sejam, talvez surpreendentemente, a *mesma* partícula. A antipartícula de um fóton continua sendo um fóton, por exemplo. Todos os férmions têm antipartículas distintas que são os *antiférmions*. Os quarks são férmions, assim há antiquarks que são bastante distintos. Vamos sair deste salão idiota agora. O único objetivo dele é impressionar, e isso não parece ter funcionado muito bem.

Saíram por uma abertura em arco que havia num canto da vasta sala de audiências. Isso os levou por um corredor de paredes revestidas e com um piso de mosaico.

— Parece estranho que todos aqueles arranjos exóticos de hádrons sejam feitos de apenas alguns quarks, se é isso mesmo — comentou Dorothy.

— Pode ser notável, respondeu o Mágico, mas não é nenhuma novidade, sabe. Constatamos que o mundo é composto de camadas como essas, com enorme complexidade numa camada sendo constituída por alguns itens da camada inferior. É o caso de rodas dentro de rodas, sabe. Há isso numa casca de noz.

— Que há numa casca de noz? perguntou Dorothy, um tanto confusa.

— Bem, outra casca de noz. É uma seqüência que se repete e se repete e se repete. O mundo parece muito complicado e diverso, e então você descobre um novo nível. Esse novo nível de matéria parece conter somente um pequeno número de objetos, e você descobre que esses objetos mais básicos se combinam uns com os outros para produzir toda a complexidade que viu acima deles. De repente, o mundo parece extremamente simples. Então você descobre que há mais desses objetos básicos do que pensava de início. Mais tarde descobre um número ainda maior deles, e é demais. O quadro simples tornou-se complicado de novo.

— Oh, céus! disse Dorothy. — O que acontece então?

— Bem, finalmente você descobre que há um novo nível. Um que tem apenas poucos objetos a partir dos quais tudo que você conhecia é feito. Um novo nível que parece básico e maravilhosamente simples. O esquema geral está ilustrado ali, terminou abruptamente.

Dorothy viu que o corredor por que estavam seguindo havia se aberto para dar lugar a uma rotunda, com um teto baixo, em forma de domo, envolto por um anel de projetores de luz que apontavam para o centro do piso. O piso aqui era decorado com um padrão circular, e no seu centro erguia-se uma estrutura elaborada que sustentava uma grande escultura esférica. A esfera ocupava a maior parte da área circular e girava lentamente em sua armação. Era ricamente entalhada e, entre as formas contorcidas que cobriam sua superfície, podiam-se ver as formas de toda sorte de animais. Havia vacas, golfinhos, pessoas, cães, gatos e camundongos. Entre as formas maiores havia entalhes mais finos: pequenos e detalhados insetos e criaturas mínimas que chegavam até o nível das bactérias. Alguns dos entalhes eram incrivelmente finos, na verdade microscópicos. Iam, sem nenhuma quebra no nível de detalhes disponíveis, até uma descrição da estrutura em hélice dupla do DNA. Dorothy não estava muito certa de como podia perceber isso, dado que tal complexidade estava muito acima do limite de sua visão normal. Apesar disso, sabia que a quantidade de detalhes possíveis estendia-se de maneira uniforme, sem ruptura, até esse nível.

Essa grande esfera era perfurada aqui e ali com fendas na sua superfície entalhada, que, de resto, era contínua. Através dessas fendas podia-se ver uma casca esférica interna, decorada com representações dos átomos de que todo o mundo acima era construído. Dorothy viu hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e, é claro, carbono. Havia outros átomos também: ferro, silício, fósforo, ouro. A es-

fera interna rodava em relação à externa e, à medida que girava, mais átomos podiam ser vistos através das fendas que se abriam na aparência mais externa das coisas. Tungstênio, titânio, platina, urânio; um número cada vez maior de átomos de diferentes tipos aparecia até que havia cerca de uma centena deles, juntamente com seus vários isótopos. Mesmo essa casca, embora muito mais simples e menos diversificada que as camadas exteriores, estava começando a parecer bastante complicada.

Essa casca interna era ela própria perfurada por fendas através das quais uma estrutura mais profunda podia ser vislumbrada; à medida que a estrutura girava, os observadores puderam ver ainda outra esfera interior. A primeira parecia ser muito simples e básica. Espalhados em sua superfície havia símbolos para os elétrons, e estes, acompanhados por prótons e nêutrons, forneciam a base para todos os átomos mostrados na casca acima. À medida que essa casca interna girava dentro da outra, no entanto, logo ficava claro que os prótons e nêutrons não eram os únicos hádrons presentes. Dorothy e seus amigos viram também híperons, ressonâncias Δ e N^*, mésons π e K, ρ, ψ, Ω e muitos outros. Os alfabetos romanos e gregos inteiros haviam sido convocados e ainda eram insuficientes. Tinham de ser ampliados por sinais subsidiários como π^+, π^0, π^- no intuito de identificar de uma maneira única cada membro da assembléia hadrônica. O número mostrado era ainda muito maior que o número de átomos presente na camada acima, e assim esse nível também começou a parecer bastante insatisfatório como simplificação final do mundo.

Na realidade, também essa casca era perfurada por fendas irregulares através das quais um outro nível ainda podia ser percebido. Essa última esfera oculta trazia as representações coloridas dos quarks. Talvez surpreendentemente, estes eram mostrados ainda na companhia do elétron e dos poucos outros léptons. O elétron, a primeira partícula a ser descoberta,[2] tomava seu lugar entre os quarks na assembléia do que pareciam ser os tijolos básicos da natureza.

Essa casca interna final não tinha nenhuma fenda em sua superfície, e nenhuma outra estrutura mais profunda podia ser vista.[3]

— Esta é uma das minhas obras de arte favoritas, disse o Mágico. Chama-se *Natureza.* Ilustra as sucessivas camadas da realidade física, os itens em cada ca-

2. O elétron foi observado e identificado como uma partícula na época vitoriana, em 1897, por J.J. Thomson, em Cambridge (Inglaterra).
3. Até onde se sabe no momento, os quarks e os léptons (juntamente com os bósons intermediários que transmitem as interações entre eles) são os componentes básicos finais da Natureza. Tenho de admitir, no entanto, que o mesmo foi pensado anteriormente acerca do próton e do nêutron.

mada sendo estruturas compostas construídas a partir dos elementos da camada inferior. Com meus quarks, consegui chegar ao nível mais básico. O quark pára aqui, você poderia dizer. Vamos, e vou lhes mostrar mais sobre a natureza dos quarks.

Contornaram a intricada representação da *Natureza* e seguiram o Mágico por uma passagem que saía da rotunda pelo lado oposto ao que tinham entrado. Esta era consideravelmente menos ornamentada do que aquela que tinham atravessado antes. As paredes eram pintadas de um amarelo pálido, sem graça, e o piso era de tábuas com uma estreita faixa de tapete gasto correndo pelo centro. A pouca distância ao longo do corredor havia uma máquina de vender em um vão. Exibia um dístico que dizia: *Quarkolés. Três Cores! Seis Sabores!* e tinha em sua frente uma fileira de botões com os rótulos "cor" e "sabor" respectivamente. O Mágico perguntou a Dorothy se gostaria de fazer uma escolha. — Você deve escolher três sabores, ele a instruiu.

— Devo mesmo? ela perguntou.

— Deve, ele disse, e então ela apertou um botão marcado com um "u", outro que trazia um "d" e finalmente, sem nenhuma razão especial, de novo o que exibia um "u".

— Agora escolho a cor que quero? perguntou.

— Não, não há necessidade. Vai obter três quarks de todo modo, um de cada cor. Você não tem escolha nesse assunto.

Enquanto ele falava, a máquina expeliu um grupinho de três objetos coloridos: um vermelho, um verde e um azul. Algum tipo de cordão os mantinha ligados uns aos outros.

— Você fez uma boa escolha, ainda que convencional. Isso que tem aí é um próton. É feito de um grupo de três quarks, como o são todos os férmions de interação forte, e no caso do próton, trata-se de dois quarks de sabor *"up"*, isto é, para cima, e um de sabor *"down"*, isto é, para baixo.

— Para cima e para baixo não são sabores! protestou Dorothy.

— Ah, sim, são sim! De todo modo, para os quarks são, foi a resposta do Mágico.[4] — Tanto o próton quanto o nêutron são feitos de quarks dos sabores *up* e *down.* O nêutron é muito parecido com o próton na medida em que tam-

4. Diz-se que os quarks têm cor e sabor. Estes são meros nomes e nada têm a ver com a cor e o sabor de coisa alguma que possamos ver ou comer. As "cores" são chamadas vermelho, verde e azul, mas estes *também* são meros nomes convenientes que nada têm a ver com a cor comum. As cores que vemos dependem da freqüência de fótons visíveis que penetram nossos olhos. Os nomes dos "sabores" do quark pelo menos enfatizam que não se está falando de sabor comum. São chamados *up, down, strange, charm, top* e *bottom* — não morango.

bém é feito somente de quarks *"up"* e *"down"*, mas contém apenas um dos sabores *"up"* e dois do sabor *"down"*. Esses dois tipos de quarks são, por si sós, suficientes para produzir os principais constituintes de todos os núcleos de todos os átomos. Há outros tipos de quarks, mas só aparecem em hádrons mais exóticos, que não vemos com freqüência. A vida, como dizem, é cheia de "ups" e "downs".

— Mas afinal, por que tive de escolher três quarks? Dorothy perguntou.

— Para poder ter três cores diferentes, é claro. Desse modo você pode obter uma partícula sem cor, e são essas partículas sem cor que compõem o seu mundo. A combinação de três quarks lhe dá os bárions. A outra maneira de fazer uma partícula sem cor é ter um quark colorido combinado com um antiquark da anticor apropriada. Isso é o que você tem com os mésons. Essa combinação é neutra do ponto de vista da cor, do mesmo modo que uma carga elétrica positiva e uma negativa dão um objeto eletricamente neutro. Como sabe, os átomos de que seu mundo é feito são eletricamente neutros.

— Sim, já ouvi falar disso, disse Dorothy. — Então essa cor de que o senhor fala seria algo como carga elétrica?

— Bem, sim, é mais ou menos disso, respondeu o Mágico. — Cor é...



— Com licença, senhor. Cor é *meu* departamento. — A interrupção veio de uma nova figura que não tinham notado antes. Ninguém a vira chegar. Era como se tivesse estado ali, inobservada, o tempo todo — como obviamente estivera, porque as interações fundamentais estão sempre presentes. Era razoavelmente mignon e vestia-se de preto como as outras Bruxas, mas nela aquilo assentava bem.

Seu manto era uma capa preta curta e seu vestido preto, que ia apenas até a metade de suas coxas, era complementado por botas pretas de cano alto. Usava um chapéu cônico como as outras Bruxas, mas o seu era minúsculo, quase se perdendo nos cachos exuberantes de seu cabelo estilo afro. Ondas verdes, azuis e vermelhas fluíam continuamente pelos seus traços.

— Sou a Bruxa da Cor, ela anunciou sem provocar surpresa em ninguém. — Cuido das forças de cor que ligam os quarks para formar os hádrons. Você perguntou se a cor era como a carga elétrica. É, mas de uma forma mais liberada. Tenho mais liberdade, pois há três tipos de carga de cor. Estes são geralmente chamados vermelho, verde e azul, embora não tenham absolutamente nada a ver com as cores comuns que você conhece. São as cores secretas que jazem sob o mundo sem cor que você vê.

— Meu mundo não é sem cor, declarou Dorothy energicamente. — Há cor por toda parte à minha volta no Kansas, embora não haja como negar certa tendência para o verde.

— Preste atenção, irmãzinha, ordenou a Bruxa abruptamente. — Não estou falando das cores da luz, mas de quarks. Seu amigo gordo aqui acaba de lhe contar como as cargas de cores se anulam umas às outras de maneira muito parecida como o fazem as cargas elétricas de EM, mas eu faço um trabalho melhor que o dela. EM é um tanto limitada porque tem só um tipo de carga elétrica, ao passo que eu tenho três diferentes cargas de cor: vermelho, verde e azul.

— Não há dois tipos de carga elétrica — positiva e negativa?, a menina protestou.

— Não, não se trata de dois tipos diferentes. Um é carga e o outro é anticarga.

— Qual é qual? Dorothy indagou.

— Como queira. Carga e anticarga são opostos. Cargas positivas e negativas são opostas. Você pode dizer que qualquer das duas que queira é a carga, e a outra seria conseqüentemente chamada de anticarga. A questão é, continuou ela com firmeza, que três tipos de carga oferecem mais maneiras de se fazer uma combinação neutra do que se tem com apenas um tipo de eletricidade. Uma possibilidade ainda é ter carga e anticarga do mesmo tipo, exatamente como no caso elétrico. Os mésons são feitos dessa maneira, são feitos de um quark e um antiquark, e podem ter as cores vermelho e antivermelho, ou verde e antiverde, ou qualquer outra.

— Nesse caso, os antiquarks têm anticor? palpitou Dorothy.

— Têm, disse a Bruxa laconicamente. — Há uma outra maneira de fazer um todo neutro, no entanto, ela continuou, e essa é ter três quarks, um de cada cor. Vermelho, azul e verde se combinam para dar nenhuma cor. É desse modo que esse tipo de cor opera. O efeito mais sensacional de ter três espécies de cargas surge quando você considera meus bósons de troca.

— O que são eles?

— São os mensageiros da interação de cor. EM tem seus fótons, e eles transmitem a interação elétrica. Eu tenho glúons, e eles fazem a mesma coisa para a cor. Mas há uma grande diferença. Bósons intermediários que transportam uma interação entre duas cargas transportam uma mistura de carga e anticarga. No caso dos fótons, eles transportam uma mistura de carga positiva e negativa, e isso

significa que não têm absolutamente nenhuma carga. Os fótons são eletricamente neutros, assim os próprios fótons não interagem eletricamente entre si. No caso dos glúons, é diferente.

— Ah! disse a menina. Como a Bruxa tinha feito uma pausa pareceu-lhe que devia fazer algum comentário, mas realmente não lhe ocorreu nenhum.

— Sim. Os glúons também transportam uma combinação de carga e anticarga de cor, mas elas não têm de ser opostas. Suas cores não se anulam necessariamente. Como há mais de um tipo de carga de cor, você poderia ter vermelho e antiverde presentes num glúon, ou azul e antivermelho em outro. Os próprios glúons transportam cor, e isso tem conseqüências de *vastíssimo* alcance. Venha ver.

Caminharam pelo tapete gasto ao longo do centro do corredor e viraram à esquerda passando por uma porta comum, banal. Encontraram-se numa sala longa e estreita com alguns brinquedos mais ou menos tradicionais espalhados por ela.

- Havia um pião, mas este girava e girava exatamente na mesma velocidade, sem nunca se tornar mais lento. Além disso, de qualquer direção que você o olhasse, seu eixo parecia se situar exatamente ao longo *daquela* direção particular.
- Havia um jogo de tabuleiro, com as peças nos lugares. Parecia um jogo comum, mas envolvia elétrons que subiam até vários níveis atômicos e deslizavam de volta.
- Havia uma pilha de blocos de construção e, a um exame mais atento, cada bloco se revelava construído por blocos ainda menores, e estes eram por sua vez divididos...
- Havia uma grande caixa, sem nenhuma característica especial a não ser uma única porta de um lado.

O Mágico abriu essa porta e se postou polidamente de lado para que a Bruxa e o grupo de Dorothy passassem antes de os seguir. Lá dentro não havia nada. Isso não quer dizer que se viram dentro de uma caixa vazia. Não havia *nada*. Estavam numa região totalmente destituída de características, vazia e sem forma.

— Este é um universo de brinquedo, comentou o Mágico alegremente. — É muito útil. Todo teórico precisa de um. Proporciona-lhe um lugar onde possa olhar para as coisas sem as complicações que surgem no mundo real. Se quer examinar dois quarks por si mesmos, você precisa de um universo de brinquedo para pô-los dentro. No mundo real, os quarks estão combinados em hádrons. Os hádrons estão sobretudo em núcleos atômicos, que estão, eles próprios, no centro dos átomos. Os átomos, por sua vez, são combinados para fornecer todas as moléculas e compostos de que seu mundo é feito, e você *sabe* o quanto esse



mundo pode ficar complicado às vezes. Para manter as coisas simples, você precisa ter seu próprio universo de brinquedo — como este.

— Certo, disse a Bruxa incisivamente, movendo-se para a frente de sua platéia. — Para mostrar as diferenças entre forças elétricas e cores, acho que o melhor que temos a fazer é olhar as interações entre duas cargas. Primeiro veremos o que acontece com cargas elétricas. Parece-me que você deveria fazer esse pedacinho — ela acrescentou, virando-se de lado para se dirigir à alta figura de EM. Ninguém tinha percebido sua chegada. Era como se tivesse estado lá o tempo todo — e é claro que tinha estado.

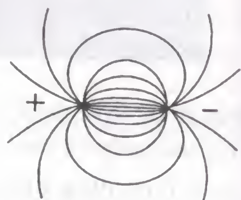
EM deu um passo à frente para ficar diante deles. — Observem uma carga elétrica, como a que seria transportada por um elétron, ela iniciou. Uma única carga elétrica apareceu diante dela, flutuando no universo vazio sob todos os demais aspectos. — Em torno dessa carga há um fluxo de fótons virtuais, ela continuou, baixando seu notável bastão com um estalo tilintante. (Isso era ainda mais

notável porquanto esse universo não tinha nada em que o bastão pudesse bater.) Da carga brotou um arabesco de linhas finas, que se irradiavam para fora como os raios de uma roda e se estendiam para o infinito. À medida que se distanciavam de sua fonte, tornavam-se mais espalhadas e difusas, demonstrando com isso como a amplitude do fóton torna-se menos intensa a uma distância maior e como a força da interação elétrica cai com a distância.

— Agora, observem como a presença de uma segunda carga, de polaridade oposta, como num próton, vai afetar o campo, ordenou a Bruxa. De algum lugar, uma segunda carga apareceu no universo de brinquedo. Essa carga tinha linhas de fluxo que se espalhavam a partir dela, exatamente como a primeira. As linhas que saíam das duas cargas se sobrepuseram e, onde o fizeram, combinaram-se, como seria de se esperar de amplitudes. As linhas de fluxo superpostas saídas das duas cargas se confundiam para dar um único conjunto de linhas que se desviavam de uma carga, faziam uma curva ampla entre as duas e depois convergiam para a outra carga. Em direção oposta à da linha que unia as duas cargas, as linhas de fluxo partiam em grandes curvas de modo a se expandir a uma distância cada vez maior e de maneira cada vez mais ampla a partir das cargas que eram a sua fonte e também o seu destino.

O campo elétrico, ou fotônico, entre duas cargas opostas

No campo elétrico entre uma carga positiva e uma negativa, as linhas de fluxo seguidas pela amplitude dos fótons virtuais se espalham e se tornam mais difusas à medida que a distância que as separa das cargas aumenta. Enquanto essa amplitude de probabilidade para os fótons virtuais torna-se mais difusa, o campo se torna mais fraco à medida que as cargas se distanciam uma da outra.



— Pode ver que, no caso dos meus fótons, não há interação elétrica entre eles. Portanto, as linhas se espalham em direções diferentes, tornando-se cada vez mais difusas quanto mais longe você as vê, observou EM. — O fluxo que se inicia em uma carga termina na outra, assim os efeitos elétricos ficam em grande parte contidos numa região próxima de uma ou de outra carga. A grandes distâncias, os efeitos das suas cargas se anulam, e então você constata que, acima de uma região suficiente, o campo patético da Bruxa da Massa torna-se dominante. EM fungou com condescendência antes de continuar.

— Fora de um átomo neutro os campos elétricos dos elétrons têm pouco efeito a qualquer distância. Para átomos que estão perto uns dos outros, os campos elétricos não se *equilibram* realmente, porque os elétrons e o núcleo positivo não estão exatamente no mesmo lugar dentro de um átomo. O ligeiro deslocamento das cargas opostas e a conseqüente inexatidão em seu cancelamento mútuo criam a força que mantém os átomos unidos num sólido. Não somente a força de uma corrente de ferro é fornecida exclusivamente pelos fótons virtuais do campo elétrico, mas ela decorre unicamente do pequeno efeito que resta quando campos opostos não conseguem cancelar um ao outro. Por causa do cancelamento entre cargas opostas, haveria pouco sinal de eletricidade no mundo mais amplo além do átomo, não fosse pelo fato de que minhas ligações, embora fortes, não são absolutas. Elas *podem* ser quebradas.

A Bruxa da Carga apontou o dedo para a carga mais distante, e um fóton de alta energia chispou da ponta de seu dedo, atingindo a carga e dando-lhe energia. Essa carga correu imediatamente para longe da outra, embora o campo elétrico procurasse contê-la. Ao se afastar, perdeu energia, lutando contra a força elétrica. Ficou mais lenta, mas, quanto mais se afastava, mais a força elétrica constantemente enfraquecia, e assim a taxa em que a carga perdia sua energia diminuiu. Era um caso de rendimentos decrescentes, ou antes, de perdas, e foi o campo cada vez mais fraco que perdeu a parada. A carga foi se afastando até desaparecer na distância do universo de brinquedo. Este tinha parecido bastante pequeno quando entraram nele vindo do quarto de brinquedos, mas no seu interior ele se estendia até a infinidade, como compete até a um universo de brinquedo.

— As duas cargas estão agora livres uma da outra, como acontece quando um elétron é arrancado de um átomo ionizado. Entre cargas como essas, a plena interação elétrica pode ser sentida a distâncias muito grandes, e são essas poucas cargas liberadas que mantêm a bandeira do eletromagnetismo tremulando alto em meio à uniformidade populista da gravidade. Essas cargas livres produzem efeitos elétricos que você pode detectar mesmo em seu mundo de grande escala. Elétrons desgarrados que se libertaram de átomos (átomos que permanecem firmemente ancorados dentro de metais) produzem as correntes elétricas que fluem dentro de suas lâmpadas elétricas e através de seus tubos de televisão

— Certo!, a Bruxa da Cor interrompeu. — Agora, *minha* interação é mais forte ainda e tem um alcance pelo menos tão longo quanto a da EM, mas você provavelmente não viu qualquer sinal que seja dela. É *porque* minha interação é tão forte e tem um alcance tão grande que você não vê muitos indícios dela.

— Isto parece ser uma total contradição, Dorothy protestou.

— Não se você pensar a respeito, irmãzinha, retrucou a Bruxa. — Você tem consciência da gravidade porque toda a massa no mundo trabalha em conjunto para revelá-la. Ali não há cancelamento, nenhum conflito interno para limitar o efeito a longa distância. Recentemente você aprendeu que, apesar da força muito maior da interação elétrica, você toma conhecimento apenas do efeito daquelas poucas cargas que se desprenderam de átomos neutros. A maioria delas continua contida dentro de metais, onde seu efeito é cancelado a grande distância pela presença de íons positivos fixos. Cargas realmente livres são de fato poucas, mas são elas que produzem todos os efeitos eletrostáticos que você vê.

— No meu caso não *há* cargas de cor livres. Os quarks que podem transportar a cor não podem se libertar — jamais! Permita que lhe mostre. Observe o que acontece com um quark colorido. — Mais uma vez, uma carga se materializou, passando a flutuar sozinha naquele universo aparentemente vazio. Esta era de uma cor vívida, mas cambiante. Dela saía um leque de duas linhas bicolores.

— Aí você vê o quark e as linhas de fluxo dos glúons que ele emite. Como no caso dos fótons, os glúons transportam carga e anticarga. No entanto, como lhe disse, os dois não se anulam porque há mais de um tipo de cor. Os próprios glúons são coloridos e são capazes de emitir outros glúons.

Ao longo das linhas alegremente coloridas, eles podiam ver pequenos pontos, como minúsculas aranhas coloridas, que desfiavam novas linhas coloridas. Estas formavam uma rede que conectava as próprias linhas de fluxo dos glúons.

O campo de cor, ou de glúon, entre dois quarks

As linhas de fluxo do campo de glúon entre um quark e um antiquark estão confinadas a um feixe estreito. As cargas de cor transportadas pelos glúons fornecem interações adicionais dentro das amplitudes de glúon. Não se dispersam amplamente, como faz o fluxo de fótons virtuais num campo elétrico. A energia permanece razoavelmente constante ao longo do feixe e, assim, a força das duas partículas permanece razoavelmente constante à medida que vão se separando.



Podia-se ver uma miríade dessas linhas adicionais, os filamentos cruzados numa teia de aranha de linhas de fluxo. Sob a influência dessa costura de linhas de cor, as linhas de fluxo do quark colorido original eram reunidas e ligadas num feixe apertado. Era esse feixe apertado que unia o quark a um antiquark que agora podia ser visto a certa distância. Não havia linhas de fluxo se espalhando largamente para os lados, como ocorrera no caso das cargas elétricas. Toda a amplitude do glúon, a amplitude que formava o campo de cor entre o quark e seu companheiro, estava confinada a essa estreita corda multicolorida.

— Você vê como as interações de cor entre os próprios glúons impediram as linhas de fluxo de se espalharem e de se tornarem cada vez mais difusas à medida que se distanciam de sua fonte. Porque os glúons atuam como novas fontes de cor, a interação é sempre forte, e a densidade de energia no campo é aproximadamente a mesma a qualquer distância. Veja o que acontece neste caso quando você dá energia ao antiquark.

Ergueu a mão e lançou alguma coisa contra o antiquark. O impacto afastou o antiquark do companheiro com o qual estava amarrado. Ao se mover para longe, perdeu energia, porque se movia contra a força que o ligava a seu colega, mas dessa vez a força não diminuiu com a distância. O antiquark perdeu energia numa taxa constante e só se afastou até ter perdido todo o impulso que lhe fora dado. Então parou, ainda tão fortemente ligado quanto antes.

— Não importa quanta energia você dê a um antiquark ou a um quark que estejam ligados, eles não vão se libertar, porque o campo do glúon pode absorver *qualquer* quantidade de energia. Como disse, a interação é tão forte e o alcance tão grande que você não pode libertar cargas de cor.

— Então essas ligações nunca podem ser rompidas? perguntou a menina. — Com certeza alguma coisa deve acabar por ceder.

— Sim, nesse ponto você tem razão. Alguma coisa realmente cede, e as ligações podem ser rompidas de certo modo, mas não como você poderia esperar. Não se dá de maneira que desprenda um quark deixando-o livre, com sua carga de cor exposta. Quando você dá mais energia a um quark ou a um antiquark ligados, eles vão se afastar e a energia irá para a ligação de glúon. Você nunca pode fornecer energia suficiente para separar os dois, mas pode conferir energia suficiente para criar as massas de um novo par quark-antiquark.

Ela ergueu a mão de novo e arremessou alguma coisa com ainda mais força do que antes contra o antiquark relativamente distante. Novamente o impacto afastou esse antiquark do companheiro a ele amarrado, e a corda multicolorida entre os dois se esticou ainda mais. Desta vez, no entanto, o antiquark não chegou a uma parada final. Em vez disso o cordão se partiu, liberando parte de sua energia armazenada para criar um novo par de quark-antiquark. O antiquark forneceu uma nova terminação para o cordão, mas esse antiquark *não* estava transportando o momento ou a energia do outro, e o cordão retornou num estalo ao seu comprimento original. O membro quark do par recém-criado havia se ligado estreitamente ao antiquark original com um curto fio de glúons coloridos

entre eles. Tinha formado um méson, um píon, que se afastou rapidamente, carregando o excesso de energia e momento.

— Como vê, observou a Bruxa da Cor, em vez de separar um quark isolado, com cor isolada, tudo que realizei foi criar um píon em adição à partícula original. Este é um evento bastante comum. Tenho certeza de que viu muitos píons sendo criados quando visitou o Cern. Se há uma grande quantidade de energia disponível, muitos píons tendem a ser produzidos, e outras partículas também, mas o que você *não* vai ver é a liberação de quarks isolados.

— Não é justo dizer que meus fótons não podem produzir nenhuma interação quando estão entre as cargas primárias, protestou a Bruxa da Carga. — Como você bem sabe, eles podem dar origem a pares partícula-antipartícula carregados e estes, por sua vez, podem criar outros fótons.

— Sim, mas um comportamento como esse só pode acontecer muito perto das cargas originais, retrucou a Bruxa da Cor. — Todas as partículas carregadas têm massa, e grande quantidade de energia é requerida para produzir essa massa. Fótons virtuais que furtaram energia suficiente para conseguir fazer isso estão restritos a uma região *muito* próxima da carga fonte. A distâncias razoáveis da carga fonte, os fótons virtuais não são capazes de obter energia suficiente para criar nem mesmo a mais leve das partículas carregadas. Não podem trocá-las ao longo de distâncias significativas. Em conseqüência, o comportamento das linhas de fluxo — as *linhas de força* — em grande escala é exatamente como você descreveu antes, sem nenhuma ligação das linhas de fluxo entre si.

— Admito que a distâncias muito curtas, como vistas por partículas de energia e momento muito altos, as cargas elétricas se tornam menos efetivamente *filtradas* pelas cargas dessas partículas virtuais — continuou a Bruxa da Cor com um sinal de assentimento para EM. — Seu eletromagnetismo torna-se *mais forte* a essas distâncias muito curtas. O oposto é verdade no caso da cor. A enorme atividade de cor que ocorre a grandes distâncias das cargas primárias, entre os próprios glúons, domina completamente, e isto significa que a força realmente se torna mais forte a distâncias maiores. A curtas distâncias, ela é relativamente fraca e não muito diferente do eletromagnetismo, mas ao longo de grandes distâncias não pode ser contestada.

. . . .

Quarkônio

A força de cor é peculiar pelo fato de ser forte a grandes distâncias (baixa energia), mas relativamente fraca a pequenas distâncias. Isso é chamado *liberdade assintótica*. Quando essas distâncias curtas são sondadas por partículas de alta energia, constata-se que combinações quark-antiquark estreitamente emparelhadas se comportam de modo bastante parecido com o de simples átomos, com um conjunto similar de estados excitados. Um sistema como esse é por vezes chamado *quarkônio*, porque parece notavelmente semelhante ao *positrônio*, o estado eletricamente ligado de um elétron e sua antipartícula, o pósitron.

. . . .

— E é assim, concluiu, voltando-se para Dorothy, — que as forças de cor se assemelham, e ao mesmo tempo não se assemelham, às da eletricidade.

— Sim, mas agora você deveria seguir em frente, interrompeu o Mágico abruptamente. — Você me perguntou antes como poderia voltar para o seu mundo. Tem que ir ainda mais longe. Vamos lá! ele ordenou, abrindo uma porta que pareceu um retângulo brilhantemente iluminado no vácuo desprovido de características. Conduziu Dorothy e seu grupo através dela. As Bruxas não os seguiram porque, é claro, já estavam do lado de fora, onde tinham permanecido o tempo todo. Dorothy e seus companheiros seguiram em fila e se viram novamente no quarto de brinquedos.

A Praça dos Imortais

10

Olharam em torno do quarto de brinquedos. Viram os muitos brinquedos que estavam lá antes e, bem num canto, observaram agora vários bebês em bercinhos.

— Quem são aquelas crianças ali? Dorothy perguntou ao Mágico. — São seus filhos?

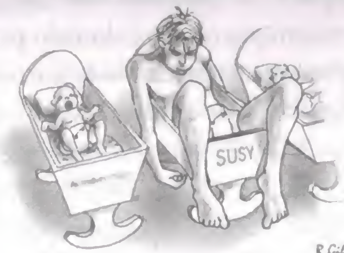
— Oh, céus, não! Este é o quarto de brinquedos *Novas Noções*, e cada um desses bebês é o fruto da imaginação de algum teórico. Eles esperam aqui na condição de pequenas hipóteses recém-nascidas, alguns mal passando de um pensamento efêmero. Têm de ficar aqui bem protegidos, fora de circulação, até que alguém apareça com os dados experimentais necessários para validá-los. Depois que medidas efetivas os tiverem confirmado de maneira adequada, podem partir como teorias maduras. Depois disso, uma teoria tem de se misturar à rudeza e à desordem do experimento, e isso pode ser muito difícil. Pode acontecer que teorias de duração bastante longa se defrontem com observações que não são capazes de explicar, e nesse caso, lamentavelmente, elas têm de se retirar. É triste, mas é assim que as coisas são.

— Para onde elas vão? perguntou Dorothy, curiosa.

— Tornam-se pensionistas do *Nãoexplicando*, um asilo que acolhe Teorias Carentes que estão sofrendo necessidades. Você vai passar por ele quando for embora daqui. As teorias que sobrevivem com sucesso a cada encontro contundente com a luz implacável da realidade experimental, no entanto, continuou o Mágico com crescente entusiasmo, vão adiante para se tornar *Leis da Natureza*. Elas são os Imortais, os fundamentos sólidos da nossa compreensão do mundo. Você provavelmente verá memoriais a algumas delas na *Praça dos Imortais* quando for embora.

Em seu caminho até a saída, passaram pela fileira de bercinhos. Em cada um havia uma pequena hipótese, de fralda e sacudindo bracinhos e pernas roliços no ar enquanto explorava o novo mundo físico que fora convocada a expli-

car. O pé de cada berço trazia o nome da hipótese que o ocupava. Um dos berços era diferente.



Estava ocupado até a máxima capacidade com a forma maciça de um adolescente corpulento, ainda de fralda mas lançando olhares mal-humorados por sob uma basta cabeleira. Seus ombros faziam os lados do berço arquear para fora e as pernas estavam penduradas sobre o pé do berço, que exibia o improvável nome SUSY.

— Quem ou o que é isto?

— Esta é a supersimetria, mais familiarmente conhecida por seus seguidores como SUSY. A supersimetria é uma noção muito apreciada por muitos teóricos. A idéia é que, num nível básico e a energia suficiente, há uma simetria profunda, tal que até os férmions e os bósons parecem a mesma coisa. Simetrias como essa são muito valiosas em física. Sua existência pode desencorajar a anarquia incipiente que poderia advir de uma infinidade de amplitudes que se combinam e manter as amplitudes sob uma controle estrito.

— Então por que ele ainda está aqui, se é uma teoria tão boa?

— Bem, esse conceito exigiria que cada partícula — férmion ou bóson — tivesse um companheiro do tipo oposto. Um elétron, por exemplo, é um férmion. A supersimetria exigiria que ele tivesse um companheiro bóson chamado "selétron". Um fóton, por outro lado, é um bóson. A supersimetria exigiria que ele tivesse um companheiro férmion chamado "fotino". O problema é que se exige que absolutamente todas as partículas tenham um companheiro do tipo oposto, e até hoje nem um só deles foi encontrado.

— Nesse caso estou surpresa de que ele ainda esteja por aqui, comentou a menina.

— Bem, seus pais e patrocinadores gostam excepcionalmente dele. Simplesmente não vão desistir. Assim, cá está ele, esperando pela descoberta de pelo menos uma partícula companheira. A paciência não tem limites.

Com estas palavras filosóficas, chegaram à porta do quarto de brinquedos. Esta abria diretamente para uma rua pavimentada, e ali o Mágico se virou para contemplá-los.

— Devo deixá-los agora, ou melhor, vocês devem me deixar. Meu lugar é aqui e não posso acompanhá-los nas jornadas que vão empreender. Antes que se vão, no entanto, posso dar a cada um de vocês um presente para ajudá-los no futuro. Para você, meu incansável companheiro de lata, tenho este presente, anun-

ciou para o Sabichão de Lata. Pegando um saco de lona que estava convenientemente posicionado perto da porta, enfiou a mão dentro e tirou um componente de metal. — Isto é um filtro de sobretensão para seu fornecimento de energia. Pode ajudar a evitar novas e lamentáveis avarias no seu sistema.

— E isto é para você, observador diligente, ele continuou, virando-se para o Espantalho. Enfiando de novo a mão no saco, tirou uma elegante caderneta acompanhada por um lápis com uma extremidade de ouro. — Não precisa se preocupar mais com qualquer ausência de cérebro em seu crânio cheio de palha. Isto lhe permitirá anotar suas próprias observações. Qualquer estudante lhe dirá que é muito melhor ter um grande conjunto de anotações do que qualquer número de fatos em seu cérebro.

— E para você, meu prolífico amigo, acrescentou, voltando-se agora para o Leão. — Seu *output* informativo foi tão extenso que nunca poderá encontrar realmente a seção exata de que precisa. Tenho para você um pacote de marcadores de livro *déjà lit*. São parecidos com a impressão de *déjà vu* que temos às vezes. A diferença é que o *déjà vu* é uma memória de algo que não vimos realmente, mas está acontecendo no momento. Estes marcadores de livro, no entanto, lhe permitem localizar uma passagem que você na verdade não leu, mas de que precisa no momento. Vai considerá-los muito úteis.

— E eu? perguntou Dorothy. — Não me parece que haja nada no saco que vá me permitir voltar para casa.

— Não, não há nada no saco, admitiu o Mágico, mas tenho algo para você. É algo que pode ser muito valioso, embora nem sempre seja bem recebido. É conselho.

— Você deve prosseguir, ele disse, com decisão e uma ponta de tristeza. — Deve continuar sua jornada de descoberta até onde puder chegar. Deve seguir seu caminho, trabalhando além dos limites da esperança e talvez além dos limites da razão. Talvez tenha de continuar sem trégua, mesmo através do Grande Deserto Experimental, mas por fim chegará a seu destino — proclamou confiantemente. — Tenha uma boa viagem. Adeus!, concluiu. Apertou calorosamente a mão de todos eles (ou a pata, conforme o caso) e fechou a porta com firmeza atrás de si.

Depois que ele se fora, deram-se conta de que não tinham recebido nenhuma orientação definida, mas o Leão declarou que seguramente deviam dobrar à esquerda, e assim fizeram. Um pouco mais abaixo na rua, o Espantalho observou uma tabuleta que dizia *Casa de Repouso Nãoexplicando*. Ela estava diante de um edifício alto, severo, cuja aparência de certo modo sussurrava subconscientemente: "Instituição vitoriana".

— É o lugar que o Mágico mencionou, exclamou Dorothy. — Vamos entrar.

Obedientemente, porque ninguém tinha idéia melhor, seus companheiros a seguiram através da alta porta apainelada, ao longo de um escuro saguão de paredes revestidas e até uma grande sala. Esta não era muito mais alegre do que o saguão. Dava uma impressão geral de sombras e silêncio, pois cortinas pesadas estavam fechadas sobre as janelas altas, chumbadas, e tapetes grossos e empoeirados absorviam o som de seus passos sobre o piso. Espalhadas pela sala havia enormes poltronas de couro, do tipo *bergère*, com abas que serviam para esconder seus ocupantes até que alguém chegasse realmente perto.

Na primeira poltrona de que se aproximaram estava uma figura antiga, decrépita. Parecia só vagamente consciente da presença deles, ou na verdade de qualquer outra coisa, e estava sentado com a cabeça afundada no peito, murmurando de maneira insana: — Ha! Flogístico![1]

— Acho que deve estar aqui há algum tempo, sussurrou o Espantalho.

— Não por tanto tempo quanto aquele grupo ali, imagino, afirmou o Leão.

Os outros olharam para o lugar que ele indicou e viram um grupo de homens com barbas impressionantes. Esses cavalheiros estavam enrolados no que pareciam ser lençóis brancos tomados emprestados das camas da instituição e seguravam uma grande laje no topo da qual havia uma espécie de mapa. Parecia a área em torno do mar Mediterrâneo. Dorothy reconheceu a característica ponta da bota italiana de suas aulas de geografia. Os homens estavam tentando equilibrar essa laje no dorso de quatro elefantinhos, mas estavam tendo dificuldade. Cada vez que a punham quase em posição, um ou outro dos elefantes escorregava, com um guincho, do casco curvo da enorme tartaruga em que estavam todos postados.[2] Um dos elefantes parecia nitidamente cor-de-rosa — talvez em resultado de seus esforços, pensou Dorothy.

Como esse grupo esforçado parecia ocupado demais para ser interrompido, os companheiros continuaram a avançar pela sala. Tiveram sua atenção atraída pelo ocupante de uma das poltronas, embora talvez *ocupante* não seja exatamen-

---

1. A teoria do flogístico foi uma antiga explicação da combustão. Pensava-se que, quando algo pegava fogo, emitia flogístico; afinal, era possível vê-lo em forma de chamas. A teoria tinha o mesmo inconveniente da maioria das teorias que pareciam muito plausíveis mas acabaram sendo abandonadas: não era verdadeira.

2. Nos tempos clássicos, considerava-se óbvio que a Terra fosse um corpo muito sólido e, em conseqüência, devia haver algo segurando-a. Uma sugestão dizia que a Terra era carregada nos ombros por um gigante chamado Atlas. Outra idéia supunha que a Terra era uma laje plana sustentada por elefantes postados no casco de uma tartaruga gigante. Não convinha perguntar em que a tartaruga se apoiava.



te a palavra certa, porque não estava sentado na poltrona. Pairava sobre ela, a alguma distância, suspenso no ar pelo formidável puxão que dava nos cadarços das próprias botas.

— Quem é o senhor, posso perguntar, e como faz isso? disse Dorothy sem nenhuma introdução preliminar. Era bastante ousadia da sua parte, mas sua curiosidade fora despertada.

— Ora, sou a Teoria do Cadarço[3]. Eu era uma hipótese sobre a natureza das partículas elementares básicas. Minha afirmação essencial era que tais coisas não existem.

— Não entendo como poderia ser isso, Dorothy protestou. — Quando visitei o Reino do Cern, eu própria as vi sendo criadas. Grande número delas.

— Bem, na realidade esse foi o problema. Quando parecia haver somente algumas "partículas elementares", era possível acreditar que eram elementares. No entanto, quando o número de partículas diferentes passou a ser de centenas,

3. "*Bootstrap theory*" é uma teoria qualquer que usa suas próprias hipóteses e conjecturas para provar sua validade. O nome vem de uma expressão muito comum em inglês, "suspender-se pelos cadarços". Você não pode suspender-se no ar puxando seus próprios cadarços! (N.R.T.)

deixou de parecer plausível que cada uma delas fosse verdadeiramente *elementar*. Parecia que eram feitas de *alguma coisa*, mas de quê?

Como ninguém sequer começou a responder a *essa* pergunta, a Teoria do Cadarço continuou. — Quando você considera a forte interação que atua sobre cada hádron, compreende que cada um é estreitamente cercado por — na verdade, contém em seu próprio cerne — uma combinação de amplitudes para todos os tipos de hádrons virtuais. É de fato *feito* delas. Há todos os tipos de hádrons presentes, *inclusive* o hádron inicial que você estava considerando. Nesse sentido, um hádron é composto de todos os hádrons, *incluindo ele mesmo!* Talvez tenha ouvido falar que dificilmente uma coisa poderia conter a si própria. Bem, um hádron é capaz de conter a si mesmo, juntamente com muitas outras coisas. Eu sustentava que tudo não passa de uma manifestação da mesma "matéria", ou campo, ou seja o que for, básicos. Deve haver alguma exigência de *coerência interna* que resulta no grupo de partículas que você realmente observa como a única seleção possível de partículas que poderiam ser compostas de si mesmas. Você poderia então prever as propriedades de todas as partículas que existem porque são as únicas que *poderiam* existir, entende? — Agora o seu discurso, que se iniciara calmo e quase tímido, havia se elevado a uma intensidade missionária.

— Mas todas as partículas de que fala não são feitas de quarks? perguntou Dorothy, sentindo-se um pouco confusa com tudo aquilo.



— Bem, sim, ele respondeu, sua voz ficando monocórdia mais uma vez. — Por que pensa que me puseram aqui? Todos os indícios experimentais que sustentam a real existência dos quarks puxaram o meu tapete. — Ele baixou os olhos para onde seus pés bamboleavam a certa distância do chão. — Não tivesse sido por isso, exclamou, eu estaria sendo celebrado na Praça dos Imortais a esta altura.

— Oh, sim! interrompeu Dorothy rapidamente. Ela estava ficando ótima em tirar partido de bons pretextos. — Precisamos passar pela Praça. Poderia nos dizer como chegar lá, por favor?

— Basta sair pela porta da frente e seguir pela rua. Não há erro, ele respondeu, soltando os cadarços dos sapatos e afundando na poltrona, exausto.

Deixaram-no, tristemente encolhido em sua enorme poltrona, e tomaram o caminho da rua. Não tinham ido longe quando a rua se abriu numa larga praça pavimentada, inteiramente crivada de monumentos de toda espécie. Tratava-se obviamente da Praça. O bando avançou pelo pavimento, parando brevemente ao passar para olhar um ou dois monumentos.

Viram a estátua de um homem com trajes do século XVII. Em torno de sua cabeça orbitavam alguns pequenos objetos. Dorothy não conseguiu saber ao certo, mas se pareciam muito com maçãs. O pedestal trazia a inscrição "Teoria da Gravitação Universal". Outra estátua era de um homem em trajes mais modernos, com um basto bigode, uma cabeleira revolta e um olhar triste. Em torno desse monumento o espaço estava torcido e contorcido em montes e depressões profundas e esse pedestal trazia a inscrição "Teoria da Relatividade Geral".

Um outro monumento parecia estranhamente indefinido. Havia uma figura nele também, embora estivesse longe de ser claro que era uma figura. Parecia muitas, todas fundidas. Havia um jogador de futebol dinamarquês, um pequeno aristocrata francês, um norte-americano piadista, um comprido e taciturno inglês, um austríaco ondulado e um alemão tabular.[4] Talvez houvesse mais — as probabilidades de se discernir outros na superposição eram grandes. Permeando toda a região, ouvia-se um som remanescente de intensa discussão. O pedestal dizia simplesmente "Teoria Quântica".

Ainda mais adiante, depararam com um pedestal que não sustentava nenhuma estátua e trazia a inscrição "Teoria de Gauge". Fora isso, a única característica visível era uma plaquinha com a inscrição "Se está procurando um monumento, olhe à sua volta". Eles olharam em torno. Com exceção do pedestal sem adornos, não conseguiram ver nada senão uma grande área plana, calçada de pedras e sem nenhum traço especial.

— O que há para ver? perguntou Dorothy, perplexa.

— Não sei. Não consigo ver nada em particular, respondeu o Espantalho. — Mas, espere um momento. Olhe para aquilo! — O Espantalho, como era do seu feitio, havia observado que a placa mudara. Agora dizia: "Não, quero dizer olhe *realmente!*"

Olharam de novo e mal puderam acreditar no que viam. Em vez do plano chato e liso, viram uma região absurdamente *des*nivelada. Grandes e preeminentes platôs se erguiam alto no ar, botaréus se projetando dos seus lados. Destes, o chão descia até buracos profundos espalhados entre eles. Nunca tinham visto tamanha miscelânea de irregularidade.

— Como pôde mudar tão depressa? disse nossa jovem protagonista, num arquejo.

— Não mudou. Apesar da mudança de sua percepção, é o mesmo pavimento. Estão vendo o efeito da transformação de gauge local.

A voz inesperada veio de trás deles. Todos se viraram e viram duas figuras vestidas de negro, uma alta e magra, outra baixa e bem proporcionada — as Bruxas da Carga e da Cor. Ninguém as vira chegar.

— Isto é uma analogia, é claro, observou EM. — As transformações de gauge se referem a fase e não a altura, mas como vocês percebem a altura como diretamente relacionada com o potencial gravitacional, isso torna a analogia razoável. Eu disse que o pavimento ficou inalterado. A essência do pavimento é ser algo sobre o que você anda, então ande sobre ele, minha filha.

Dorothy olhou a cena diante de seus olhos, os picos escarpados e os abismos profundos. Queriam realmente que ela andasse através daquilo? No entanto, a Bruxa da Carga era uma figura tão autoritária que se viu rumando em direção à paisagem distorcida, embora tenha escolhido prudentemente começar numa direção em que o solo declinava apenas ligeiramente.

Ficou pasma ao constatar que, à medida que avançava, alguma força parecia sustentá-la, de maneira que pisava no nível mais baixo sem nenhum tranco. Isso lhe infundiu confiança, de modo que avançou para a área em que o chão sumia num declínio que a teria abalado severamente quando chegasse ao fundo. Novamente foi assentada de maneira suave, sem nenhuma sensação perceptível de queda. Isso a impressionou tanto que mandou a cautela pelos ares e correu livremente pela área, sem prestar qualquer atenção à grotesca distribuição de picos e buracos. Quando saltou num abismo profundo, pousou tão suavemente que foi como se tivesse pisado numa trilha plana. Quando rumou para um pico alto, elevou-se no ar e pisou no seu topo sem nenhuma percepção de ter feito algum esforço. Fechou os olhos por um instante, e teve exatamente a sensação de estar caminhando pela superfície plana que havia observado antes.

Abrindo os olhos, viu que os outros tinham se juntado a ela. O Espantalho estava se agitando de um lado para outro com seu jeito desengonçado habitual. À vista dos seus membros bambos, já parecia de fato extraordinário que fosse capaz de se deslocar em terreno plano, mas agora pairava e despencava das alturas para os abismos sem nenhum sinal de esforço excessivo. O Sabichão de Lata se movia desajeitadamente, braços e pernas rebrilhando como pistões, enquanto também ele se elevava a grandes alturas e descia às profundezas. Seu rosto não

4. Niels Bohr, Louis de Broglie, Richard Feynman, Paul Dirac, Erwin Schroedinger e Werner Heisenberg. Peço desculpas a todos os envolvidos pela mistura aleatória de características pessoais irrelevantes e referências às suas teorias específicas.



mostrava nenhum sinal de que aquilo lhe parecesse notável de algum modo, mas é verdade que pode ser difícil interpretar a expressão de um cilindro de metal sem feições. Quanto ao Leão, estava dando saltos altíssimos de um nível para outro. Embora estivesse a alguma distância, Dorothy o ouviu rugir: "Experiência extraordinária. Tenho de escrever um livro sobre ela."

Enquanto seus companheiros brincavam por ali naquele assombroso parque de aventuras, Dorothy notou que, embora permanecesse incrivelmente acidentado, o terreno mudava de um instante para outro. Por vezes uma região elevada substituía abruptamente uma depressão, ou um buraco se enchia de repente. Depois, com o tempo, ela notou que o solo estava se tornando menos retorcido. Ainda havia elevações e declives, mas não eram tão pronunciados e estavam gradualmente se nivelando. Logo a área pareceu tão plana quanto a tinham visto de início. Já não havia nenhuma força de aparência inusitada em ação, somente a força normal, constante, que sentimos quando o solo empurra nossos pés para cima. O senso de aventura se fora, e assim eles voltaram para onde as Bruxas os esperavam pacientemente. Assim que estavam todos reunidos, a Bruxa da Carga falou-lhes de novo.

— Este interlúdio ilustrou para vocês uma característica importante de qualquer sistema que não se modifica sob uma *transformação local de gauge*. É

preciso haver uma força associada com a transformação — uma força que equilibre as mudanças físicas que de outro modo vocês detectariam. No caso do terreno em que estão postados, vocês não notariam uma mudança *global* no nível. Se a área *inteira* se elevasse uns 30 metros no ar, ela continuaria plana e vocês continuariam a poder andar por ela sem notar a mínima diferença. Uma mudança local é diferente. Se diferentes áreas mudassem de nível arbitrariamente em quantidades diferentes, vocês certamente o notariam se caminhassem por elas, a menos que haja, como neste caso, uma força presente que muda de maneira tal a compensar as mudanças de nível.

EM fez um aceno para indicar a visão recém-desvanecida de picos e depressões.

— Como disse, isto foi uma analogia. Uma transformação de gauge não diz respeito a altitude, mas a fase. O nome *transformação de gauge* não é muito significativo — é um mero acidente histórico. Seria muito melhor dizer que um sistema tem *independência local de fase*. Talvez saibam que uma mudança na fase global de todas as amplitudes não tem absolutamente efeito algum. As probabilidades que vocês derivam de uma amplitude não dependem da fase *global* de todas as amplitudes. Uma transformação local de fase não afeta as fases relativas das diferentes amplitudes. Estas controlam as interferências entre as amplitudes e podem ter grande efeito sobre as probabilidades que você observa. Não haveria meio de ocultar essas grandes diferenças. O que independência local de fase significa é que você não pode detectar uma mudança na fase de *todas* as amplitudes, mesmo uma mudança que varie de um lugar para outro. É uma afirmação sobre as amplitudes e também sobre o espaço e o tempo.

A Bruxa fez uma pausa e dirigiu um olhar sério à sua platéia.

— O modo como as fases das amplitudes variam de um lugar para outro dificilmente poderia escapar de ter algum efeito no que vocês observam. Se as fases das amplitudes puderem ser alteradas arbitrariamente em diferentes quantidades e diferentes lugares sem que ninguém perceba, isso impõe severas restrições. Vocês esperariam que tais mudanças arbitrárias de fase tivessem efeitos observáveis, e esses efeitos só poderiam ser evitados se fossem *equilibrados* de alguma maneira. Isso pode ocorrer se houver uma força presente em toda parte que seja afetada pelas mudanças de fase — e se essa força mudar de maneira tal a contrabalançar aqueles efeitos causados pela alteração das amplitudes.

. . . .

Invariância local de gauge

Este conceito recebeu um nome infeliz. Seria melhor chamá-lo *independência local de fase*.

O pressuposto da independência local de fase é que, se a fase de todas as amplitudes mudarem *localmente*, não se produzirá nenhuma diferença observável. Isto se aplica certamente à fase total em toda parte, uma chamada mudança *global* de fase. A sugestão é de que também não deveria haver diferença observável se as fases mudarem aleatoriamente em diferentes quantidades e diferentes lugares.

Por que semelhante opção deveria ser sequer considerada? Bem, a física avança propondo e avaliando toda sorte de idéias esquisitas. Esta idéia teria a vantagem de impor a necessidade de uma cooperação muito estreita entre todas as amplitudes, o tipo de cooperação que precisariam exibir para fazer a noção de renormalização funcionar. (Veja o capítulo 8 para uma discussão da renormalização.)

Você constata que uma mudança local de fase como essa *produziria* efeitos observáveis a menos que existisse uma *interação* que, ela própria, mudasse de maneira tal a compensá-los exatamente. Essa interação teria algumas propriedades bastante estranhas, mas elas se revelaram ser as mesmas propriedades já conhecidas em relação à interação eletromagnética. O eletromagnetismo é também a interação para a qual se sabia que o processo de renormalização funcionava bem.

Interessante?

. . . .

A Bruxa parou e olhou de cara feia para Dorothy e seus amigos.

— Vocês poderiam perguntar qual é o sentido de sequer considerar esse tópico complicado, absurdo e desnecessário, ela declarou. Dorothy *tinha* pensado em fazer uma pergunta desse gênero, mas agora reconsiderou.

— O importante com relação a um sistema que fica *inalterado* por uma transformação local de fase é que isso, por si mesmo, força grande cooperação entre as fases de todas as amplitudes envolvidas. Essa cooperação é valiosa, até vital. Foi dito a vocês que o campo em torno de uma partícula contém um número infinito de amplitudes. Para que a superposição dessas amplitudes seja controlada, mesmo na extensão limitada implicada por uma renormalização infinita da carga e da massa, deve portanto haver considerável disciplina e cooperação entre todas as amplitudes. Acontece que cooperação suficiente é assegurada se todo o sistema não for alterado quando as amplitudes são mudadas por uma fase arbitrária e uma mudança diferente é feita em diferentes pontos. De fato, parece que esta é a única maneira que permite se alcançar bom comportamento.

A Bruxa fez uma pausa e olhou em volta, mais parecendo uma professora rígida e antiquada.

— A necessidade de considerar tanto a amplitude quanto a força não é estranha quando pensamos a respeito. Uma força ou interação é, afinal de contas, apenas o efeito de bósons virtuais, e estes são descritos por uma amplitude, como o são todas as partículas. Estamos dizendo simplesmente que, quando consideramos o efeito de se mudar a fase de *todas* as amplitudes, devemos incluir igualmente as amplitudes para os bósons de interação. Isto é, com certeza, apenas justo e razoável.

— É exigido que as mudanças locais de fase não afetem de maneira alguma o que pode ser fisicamente observado. Nesse caso é papel da "força", ou das amplitudes dos bósons virtuais, mudar de tal maneira a conciliar quaisquer mudanças que de outro modo seriam observáveis. A noção de semelhante cooperação não deveria parecer demasiado estranha, dado que a própria idéia de interferência quântica é um esforço colaborativo entre diferentes amplitudes. Neste caso, as exigências são particularmente rigorosas. Essa necessidade de independência local de fase impõe uma natureza muito específica — e sob muitos aspectos uma natureza peculiar — à força. As propriedades e o comportamento do espaço-tempo exigidos são tais que a idéia poderia não lhes parecer plausível, *a não ser* porque já se conhece uma interação que possui todas essas propriedades. É o eletromagnetismo: QED.[5]

EM parou de falar e ficou olhando para eles, de cima para baixo, com um ar conclusivo. A figura mais baixa da Bruxa da Cor adiantou-se e falou por sua vez.

— Ela está se referindo, é claro, à Eletrodinâmica Quântica (QED, em inglês), a teoria da luz e da matéria. Trata-se de um teoria de gauge, e a independência local da fase define a teoria. O mesmo se aplica à QCD — isto é, à Cromodinâmica Quântica, a teoria de quarks e cor. Esta também depende de uma independência local de gauge, mas, como há agora a liberdade adicional fornecida pelo número de cores, as mudanças de fase não são meros números, incluindo também uma rotação entre as três cores.

— Como vêem, ela afirmou, esperançosa, uma rotação global das cores não afetará a ligação pela força de cor. Se o vermelho se tornar verde, o verde se tornar azul e o azul se tornar vermelho, um bárion ainda conterá um quark de cada cor e ainda estará ligado. Se um méson contivesse um quark vermelho e um antivermelho, então passaria a ter um quark verde e um antiverde e ainda estaria ligado. Na realidade, a amplitude do méson seria uma mistura de todas as três possibilidades de cor, e isso permaneceria inalterado pela rotação de cor. Como ocorre com a fase simples, não se pode ignorar facilmente uma mudança *local* de cor. Mudanças aleatórias de cor de um lugar para outro produziriam mudanças

5. Aqui a Bruxa está fazendo um jogo de palavras (ou melhor, um jogo de letras). QED é a abreviação de *quod erat demonstrandum*, usada na conclusão de demonstrações matemáticas com o significado aproximado de "como se queria demonstrar".

arbitrárias de cor semelhantes às que ocorrem quando um glúon colorido emite um outro glúon colorido. Essa emissão de glúon é então interpretada como um comportamento da força compensadora.

— A necessidade de compensar e eliminar todos os sinais evidentes de um comportamento como esse impõe restrições muito severas à forma das interações e força um bom comportamento cooperativo entre as amplitudes. Fica um pouquinho complicado, ela admitiu finalmente. — Há alguns traços óbvios, no entanto, como o fato de que os bósons de interação deveriam ser desprovidos de massa.

— Mas por que é assim? perguntou Dorothy. Estava quase certa de que a Bruxa planejava dar algum tipo de explicação, mas percebeu que o Leão estava se aproximando com um livro intitulado *Ele não é pesado, é o meu bóson,* de Ivo C. Leão. Felizmente, a Bruxa voltou a falar antes que ele a alcançasse.

— Em seu papel de um chamado campo de gauge, a interação tem uma missão de conciliação. Deve ser capaz de compensar quaisquer efeitos observáveis que de outro modo apareceriam e, para fazê-lo, precisa estar presente em toda parte. Deve ter grande alcance, com linhas de força que se estendam até a infinidade, como aquelas do campo eletromagnético.[6] Isso significa que seus bósons virtuais não podem ter massa.

— Isso é uma decorrência inevitável? indagou nossa heroína. Estava começando a ficar cansada daquele tipo de afirmação negligente.

— Oh, sim. Com toda certeza. Você sabe que um bóson de campo é emitido por alguma partícula que não tem nenhuma energia própria para gastar com a criação de partículas e que precisa tomar emprestada a energia que não possui. Trata-se portanto de uma partícula virtual, e toda energia que tem teve de ser tomada de empréstimo, como disposto nos termos da relação tempo-energia. Se ela precisar de energia para criar massa de repouso, não poderá detê-la por muito tempo e não poderá ir muito longe. Bósons de troca dotados de massa produzem forças de *curto alcance*, e as linhas de fluxo cessam ainda perto de sua fonte. Para que as linhas se estendam até a infinidade, para que a força seja de grande alcance, os bósons não podem ter massa. Se não há massa alguma, não há necessidade de energia para criá-la, nenhum limite inferior de energia exigido pelos bósons virtuais, e nenhum limite superior para seu alcance. A força terá alcance

6. Este talvez não seja um argumento totalmente convincente para "bósons de gauge" sem massa. Há outros argumentos que *são* convincentes, mas dependem das propriedades de transformação do termo massa no campo lagrangiano, de propriedades relativísticas dos spins das partículas, ou do efeito Bohm-Aharanov. Acredite-me, você não quer saber sobre eles.

infinito, declinando com a distância apenas porque o mesmo fluxo está disperso sobre uma área cada vez mais ampla.

— Isto basta por agora, concluiu a Bruxa da Cor. — Tenho certeza de que ouviram tudo que queriam sobre teorias de gauge. Talvez até um bocadinho mais. O melhor que fazem agora é se pôr a caminho. Há mais coisas para ver e vocês não as encontrarão entre estes monumentos. Precisam ainda conhecer a última de nossas irmãs, a Bruxa Fraca.

— Ela não parece muito importante, disse Dorothy.

— Você não pode julgar por um nome, ou mesmo por uma taxa de interação. Ela é uma criatura estranha, e pode fazer coisas de que não somos capazes. Ela *transforma* quarks. Atravessem a Praça dos Imortais e, depois de sair da cidade, tenho certeza de que logo a encontrarão, ou ela os encontrará. Portanto, em frente, garota.

Assim instruídos, Dorothy e seus companheiros seguiram as orientações e logo estavam fora da cidade, caminhando por uma calma vereda rural.

11

Uma Velha Fraca

Ao caminharem pela vereda, Dorothy avistou umas flores de aparência estranha na sebe.

— Parecem estranhas, exclamou.

— De fato, *são* estranhas. São kaonemônias e contêm káons, que por sua vez contêm quarks do tipo "*strange*" — comentou o Espantalho, que as tinha observado antes.

— Que são quarks do tipo "*strange*"?

— Bem, obviamente são quarks com estranheza.

— E que é estranheza? perguntou Dorothy, embora sem grande confiança de receber uma resposta. Mas, antes que o Espantalho ou qualquer outro pudesse responder, todos perceberam que as flores estavam inegavelmente *mudando*. Não todas de uma só vez, não de repente, mas pouco a pouco, a visão das flores foi substituída pela de uma floração de aparência muito mais comum, lembrando bastante margaridas. As flores estranhas murcharam lentamente e restaram apenas botões banais, indistinguíveis dos outros que os cercavam.

— É ela! exclamou o Espantalho, sem a preocupação de ser explícito. Ela! A Bruxa Fraca. Ela deve ter feito isto. E deve andar por perto, pois é uma interação de curto alcance.

Todos olharam em volta e Dorothy viu, esgueirando-se através da sebe, uma figura baixinha totalmente enrolada num manto preto com capuz. Mais que depressa foram ao encalço da figura elusiva, apenas vislumbrada, através das árvores. Perderam-na de vista logo antes de chegar a uma clareira na mata. No meio desta havia uma cabaninha de conto de fadas. Não havia nem sinal da figura vestida de preto que tinham estado seguindo, mas, como parecia provável que estivesse dentro da casa, dirigiram-se para ela e o Leão tocou confiantemente a campainha. Após um breve intervalo a porta foi aberta por uma figura vestida de negro e com um capuz puxado sobre a cabeça de modo que seu rosto ficava completamente obscurecido.



— Olá, meus lindos, ela grasnou numa voz que convinha muito bem a uma bruxa. — Então estão perdidos no bosque, meus queridinhos?

— Não, não estamos, trovejou o Leão, de modo confiante *e* assertivo. — Estamos a apenas uns cem metros da estrada e também não somos queridinhos. Você é a Bruxa Fraca, não é? Dorothy, esta mocinha, deseja saber tudo que puder lhe contar sobre a interação fraca. — Dorothy não estava tão convencida daquilo, mas deixou passar.

— Certo, certo, disse a Bruxa bruscamente, retornando a uma voz normal. — Se não querem participar do faz-de-conta, o melhor é entrarem.

Introduziu-os à sua cabana e a uma pequena cozinha nos fundos. A morada toda tinha um quê de estranhamente apetitoso, e uma grande panela preta borbulhava sobre um fogo no canto. O Espantalho comentou a atmosfera saborosa da casa.

— Bem, tenho um certo jeito para sabores, admitiu a Bruxa num tom um tanto presunçoso. — O meu orgulho são minhas prateleiras de sabores.

Apontou seis pequenos conjuntos de prateleiras na parede do estreito cômodo. Estavam arranjadas em dois grupos, cada um compreendendo três conjuntos de duas prateleiras, uma sobre a outra. Na parede oposta havia mais prateleiras, aparentemente idênticas às da primeira parede.

— As três da esquerda são para léptons, as três da direita para quarks, explicou a Bruxa. — Nas prateleiras de quarks tenho diferentes sabores nas fileiras de cima e de baixo. Nas prateleiras de cima tenho quarks dos sabores *"up"*, *"charm"* e *"top"*. No nível abaixo estão quarks *"down"*, *"strange"* e *"bottom"*. Isto tem a vantagem de agrupar os quarks segundo a carga elétrica. Estão dispostos em dubletos, cada um no nível superior estando emparelhado com um no nível inferior. Os quarks nas prateleiras de cima têm maior carga elétrica; os das inferiores têm carga menor.

— Entendo. Será que isso significa que têm uma única unidade de carga na prateleira de cima e nenhuma na de baixo, ou talvez duas na prateleira de cima e uma na de baixo? perguntou a menina. Gostava de aproveitar as oportunidades de arejar seus novos conhecimentos. Aprendera em sua visita ao Cern que a carga elétrica transportada por uma partícula era sempre algum múltiplo da carga no elétron, embora as cargas pudessem ser tanto positivas quanto negativas.

— Não, não no caso do quarks. Os quarks da prateleira de cima têm uma unidade de carga a mais que os da de baixo, é verdade, mas nenhum deles tem uma carga que seja um número inteiro de unidades de carga de elétron. Os mais altos têm uma carga de +2/3 de uma unidade, e os mais baixos, de -1/3.

— Mas isso não pode ser! Dorothy protestou. — Disseram-me claramente no Reino do Cern que toda partícula que observam ou não tem carga alguma, ou, quando tem, trata-se de um número inteiro de cargas de elétron. — O Espantalho assentiu tão entusiasticamente à referência a cargas observadas que a impressão que se teve foi a de que sua cabeça poderia cair. Dorothy desconfiava que, no caso dele, esse podia ser um perigo muito real.

— Talvez seja assim no caso de partículas observadas, retrucou a Bruxa, mas os quarks *nunca* são observados. Como você jamais pode liberar um quark, não pode observar a carga elétrica de um deles isoladamente. Uma vez que é preciso três quarks para fazer um bárion, e que os bárions têm cargas que são múltiplos da unidade padrão, segue-se que os quarks terão cargas múltiplas de *um terço* da unidade padrão. E essas são as cargas verificadas. Algumas são dois terços e algumas são um terço, mas nenhum quark tem uma carga que seja um número inteiro de unidades padrão de elétrons.

— Se você quiser cargas integrais, terá de olhar para os léptons, ela continuou, apontando os outros três conjuntos de prateleiras. — Eles não são confinados, são livres, estão aí fora para todos verem, e *têm* cargas que são um numero inteiro de cargas de elétron. No primeiro conjunto você tem o elétron. Ele tem uma única carga de elétron, como não é de surpreender. Os outros dois conjuntos guardam as outras "gerações" de léptons: o múon e o tau. Nas prateleiras de baixo em cada caso estão os tipos apropriados de neutrinos que são emparelhados com cada um dos três léptons carregados. Talvez não tenha encontrado neutrinos antes. Eles são os meus queridinhos muito, muito especiais.

Léptons e quarks

Há três "famílias" tanto de léptons quanto de quarks. Cada família contém um "dubleto" de partículas. Além disso, os quarks vêm em três "cores" – vermelho, verde e azul – como foi discutido antes.

Léptons			Quarks		
e	μ	τ	u	c	t
ν_e	ν_μ	ν_τ	d	s	b

No caso dos léptons, os da fileira de cima têm a mesma carga que o elétron, ao passo que os vários *neutrinos* ν na segunda fileira não têm carga elétrica nenhuma. Os quarks da fileira de cima têm uma carga que é +2/3 da carga padrão, e os da fileira de baixo têm -1/3 dessa carga.

— Não vejo nada.

— Nem eu.

Todos olharam em volta para ver quem tinha falado. Espremidas no espaço que sobrava da cozinha estreita, viram EM e a Bruxa da Cor. Ninguém as vira chegar (mas afinal, é claro, tinham estado lá o tempo todo).

— Duvido que possam, minhas caras! tripudiou a Bruxa Fraca. — Não há nada para nenhuma de *vocês* duas verem. Os neutrinos estão lá, sem dúvida. Há nada menos que três diferentes variedades deles, mas, como não têm carga elétrica, *você* não os pode ver. — Voltou-se para EM ao dizer isso. — Os léptons em geral não têm carga de cor, de modo que *você* não os vê também, continuou, acenando com a cabeça encapuzada para a Bruxa da Cor. — Os neutrinos são todos meus, para que só eu os veja. Como escapam à atenção das interações dominantes, são criaturinhas escorregadias, furtivas, que podem ir terrivelmente longe sem que ninguém os perceba. Eu os amo — acrescentou.

— Os neutrinos são emitidos pelo Sol, ela continuou, dirigindo-se diretamente a Dorothy. — Uma grande multidão de neutrinos cai sobre a Terra, como o fazem os fótons, que constituem a luz vinda do Sol. A diferença é que quase todos os neutrinos passam diretamente através da Terra sem sequer se dar conta de que ela está no seu caminho. — Olhou carinhosamente para a fileira

inferior de prateleiras, em cada uma das quais Dorothy pensou que talvez pudesse perceber pálidos fantasmas.

— A primeira geração contém os trabalhadores. Entre os léptons isso significa o elétron. Entre os quarks, a primeira geração contém quarks *up* e *down* — os quarks de que são feitos tanto o próton quanto o nêutron.

— Mas então por que há mais duas gerações? Dorothy cochichou para o Espantalho, que estava próximo. — Não sei. Talvez para se fazerem companhia? cochichou o Espantalho em resposta.[1]

— Vocês encontraram todas estas partícula antes, continuou a Bruxa. — Afora o neutrino, é claro. Mas o que torna minha interação fraca diferente de todas as outras é que tenho a bossa de transformar um sabor em outro. O universo está repleto de prótons e elétrons na forma de hidrogênio. Por que o universo não está cheio de nêutrons também?

— E não está? Dorothy sussurrou para o Leão. — Não, o leão rugiu de volta, baixinho.

— É porque o nêutron *decai.* Um nêutron é mais pesado do que as massas combinadas de um próton e um elétron, e portanto há alguma energia para gastar, energia que pode ser liberada num processo de decaimento que origina essas duas partículas. De fato vocês acabam tendo três partículas, como vou explicar. Os quarks de sabor *"down"* podem decair em quarks de sabor *"up"*, e é minha interação fraca que causa esse decaimento. Os bósons virtuais da interação fraca podem transportar carga, e quando um bóson desses é emitido ou absorvido, a partícula que o emite ou o absorve vai mudar sua carga elétrica e se transferir entre as posições superior e inferior num grupo. Um nêutron contém dois quarks *"down"* e um quark *"up"*. Um desses quarks *"down"* pode emitir um bóson negativamente carregado, e no processo o quark *"down"* deve aumentar sua carga de maneira correspondente e assim tornar-se um quark *"up"*. Isso resulta num bárion que agora contém dois quarks *"up"* e um quark *"down"*. O nêutron tornou-se um próton. O bóson virtual negativamente carregado pode então ser absorvido por um neutrino para produzir um elétron negativamente carregado — e é isso, concluiu a Bruxa.

— Será que isso significa que esse decaimento fraco só pode ocorrer se houver um neutrino por perto para absorver o bóson? perguntou Dorothy. Isso não

---

1. Eu também não sei. Até onde estou informado, ninguém sabe por que há três gerações de léptons e quarks, os dois conjuntos adicionais imitando grosseiramente as propriedades do primeiro. Curiosamente, não parece haver mais de três conjuntos. Há bons indícios de que há apenas três tipos de neutrinos. Se houvesse mais tipos de neutrinos, o bóson Z (ver adiante) poderia e iria decair neles assim como nos tipos conhecidos e portanto iria decair mais rapidamente do que é observado.

parecia absurdo demais depois do que a Bruxa dissera sobre o enorme número de neutrinos que passam pela Terra.

— Bem, não, realmente não. E digo isto num sentido técnico, respondeu a Bruxa. — Não há necessidade alguma de um neutrino *real.* O bóson pode ser absorvido por um neutrino virtual num par neutrino-antineutrino que tenha sido criado no vácuo. Lembre-se de que o vácuo está cheio de pares partículas-antipartículas, e isso inclui neutrinos. Por serem tão numerosos, serão muito mais prontamente disponíveis que quaisquer neutrinos chamados *reais,* assim como a intensidade de fótons virtuais pode ser tão maior que a de fótons reais em qualquer feixe de luz concebível. Esse neutrino virtual é convertido num elétron, e seu antineutrino virtual companheiro recebe energia suficiente para se tornar real. Como o neutrino é virtualmente sem massa, isso não requer realmente muita energia. Se você somar tudo, verá que o efeito observável é que um nêutron inicial desapareceu, decaiu. Em seu lugar, há agora um próton, um elétron e um antineutrino — três partículas ao todo. Quando esse processo ocorre com um nêutron dentro de um núcleo, é chamado decaimento β.

— Perguntei ao Inspetor Nuclear sobre o decaimento β, lembrou Dorothy, mas ele não respondeu.

— Talvez agora você compreenda por que ele preferiu não o fazer, observou o Espantalho.

— Meus bósons só são capazes de causar uma transferência entre os membros superior e inferior do mesmo dubleto, continuou a Bruxa, mas isso é tudo que é necessário para o decaimento β, porque os quarks *"up"* e *"down" estão* no mesmo dubleto.

— Mas então isso não explica o decaimento dos quarks *strange* em káons, refletiu Dorothy, que estivera prestando muita atenção em tudo e se lembrava do que o Espantalho dissera pouco antes de observarem a Bruxa Fraca. — Pelo que você disse, os quarks *"up"* e *"down"* estão num dubleto diferente do dos *"strange"*, e você disse também que seus bósons virtuais só podem produzir uma mudança entre dois membros do mesmo par. — Ela apontou o dubleto de prateleiras que continham os quarks *"up"* e *"down"* para enfatizar seu argumento.

— Só um minuto aí, pessoal, interrompeu a Bruxa da Cor. — Não é um quark *"down"* que está na prateleira de baixo. Não puramente. Trata-se de um estado misto, uma superposição de quarks, ela acrescentou, para ser bastante clara. Dorothy olhou para o que estava tomando por um quark *"down"*. Não podia ter plena certeza, mas talvez ele parecesse *mesmo* um pouco misturado.

— Besteira! foi a resposta da Bruxa Fraca à Bruxa da Cor. — Aquele é sem dúvida um de meus estados de sabor. É o único companheiro para o quark *"up"*, puro e simples. Não há dúvida quanto a isso. — Curvou-se para examinar o es-

tado contencioso mais de perto e jogou para trás o capuz que a escondia para ver mais claramente. Quando sua face emergiu da sombra profunda que até então a ocultara, viram que apresentava notável semelhança com EM. Era mais baixa e de constituição mais robusta, mas sob os demais aspectos a semelhança de família era notável. Sua aparência de bruxa era acentuada pelo fato de ser vesga; seus olhos fitavam em direções completamente diferentes.

— Há *todas* as dúvidas, respondeu a Bruxa da Cor, agressivamente. — Você pode ser zarolha, mas eu posso ver um quark bastante bem e sei se estou vendo um estado puro e singular de quark ou uma mistura. Aquilo é uma mistura, arrematou com firmeza.

As duas bruxas tinham se aproximado e estavam agora face a face. Dorothy temeu que a situação estivesse prestes a ficar feia quando um inesperado pacificador entrou na briga. Era o Leão Confiante.

— É muito simples, realmente, ele começou. Talvez não fosse a abertura mais prudente, mas chamou a atenção das duas bruxas. Elas tiveram sua atenção ainda mais despertada pelo fato de ele enfiar o braço atrás de uma caçarola e de lá tirar um livro intitulado *A força do fraco*, da autoria de Ivo C. Leão. Hesitantemente, ele abriu o livro numa página que, como Dorothy notou, estava assinalada por um marcador de livro. — Esses marcadores são realmente inestimáveis, murmurou ele. — Aqui está a seção de que preciso. Logo aqui sob o título "Vista fraca". As senhoras estão ambas certas. Cada uma de seu ponto de vista. Para a interação forte, o que significa para as forças de cor, os quarks *"down"* e "*strange*" são distintos e diferentes. É possível distingui-los claramente, observou, meneando a cabeça e jogando sua grande juba na direção da Bruxa da Cor. — Um quark "*strange*" tem estranheza. Embora isso não passe de um nome que é dado a qualquer característica que torna um quark "*strange*" distintivo e diferente de um quark *"down"*, percebe-se muito bem essa distinção. Ambos têm a mesma carga elétrica, um terço da carga de um elétron, mas não são idênticos. A interação forte não pode transformar acidentalmente um quark "*strange*" num quark *"down"*. Eles são diferentes, e no que diz respeito à interação forte, assim permanecem. Nas suas mãos a "estranheza" é conservada.

— A interação fraca, por outro lado, disse ele, voltando a cabeça para a Bruxa Fraca, não leva a "estranheza" em consideração. A senhora não a vê em absoluto. Para a senhora, os quarks *"down"* e "*strange*" são equivalentes. A senhora não os distingue, e os estados que vê poderiam com a mesma facilidade ser a soma de ambos — conseqüentemente, eles o são. A senhora vê um estado de quark na posição inferior num dubleto, e esse estado está emparelhado com o estado *"up"*, mas o estado que a senhora vê não é exatamente o mesmo que qualquer dos estados vistos pela Bruxa da Cor. A senhora vê as coisas de maneira

diferente e tem critérios diferentes. O estado a partir do qual seus bósons virtuais podem produzir um quark *"up"* não é exatamente um quark *"down"*. De fato, é uma mistura de "*down*" e "*strange*". Ambos os quarks, *"down"* e "*strange*" podem decair para um quark *"up"* porque ambos estão presentes na amplitude específica que a senhora e sua interação vêem como emparelhada com o quark *"up"*. O estado contém uma amplitude menor para o sabor "*strange*" do que para o sabor *"down"*, assim o quark "*strange*" decai mais lentamente. É só isto.

Dorothy, sentindo que aquilo era tudo que queria saber sobre estranheza e a transformação de quarks *strange*, decidiu portanto que estava na hora de mudar de assunto. Fez um comentário sobre a notável semelhança da Bruxa Fraca com EM, a Bruxa da Carga.

— Sim, somos irmãs, respondeu a Bruxa Fraca. — Embora pareçamos muito diferentes, somos sob muitos aspectos a mesma pessoa. Gêmeas idênticas uma da outra. Nossas interações têm a mesma força, por exemplo.

— Como isso é possível? exclamou a menina, assombrada. — Disseram-me não sei quantas vezes que a força e o alcance de EM são consideráveis, ao passo que sua interação é, bem, fraca.

— Eu disse que nossa força é a mesma, não nosso alcance. O âmbito de minha interação fraca é curto, e por isso, embora a força do emparelhamento com uma partícula possa ser tão grande quanto no eletromagnetismo, as taxas de decaimento produzidas são muito menores. — Parou de falar, como se tudo estivesse claro.

— Lamento, mas não consigo entender isso muito bem, disse Dorothy o mais delicadamente que pôde.

. . . .

A interação eletrofraca

Atualmente considera-se que as interações eletromagnética e fraca estão *unificadas* numa única interação eletrofraca, apesar das diferenças aparentemente grandes que as separam.

São compreendidas como sendo basicamente a mesma coisa porque a força com que os bósons de interação se ligam à sua fonte é basicamente a mesma em toda parte. Esses bósons são o fóton, o W^- +, o W^- e o Z.

O fóton é desprovido de massa e ele próprio não tem carga, mas só é emitido por carga elétrica. Não há nenhuma mudança discernível numa partícula depois que ela emitiu um fóton.

Os outros três bósons têm massas muito grandes, cerca de cem vezes maiores que a do próton. Isso dá à interação um alcance extremamente curto e ela é muito menos capaz de causar transições e decaimentos do que a interação de longo alcance transporta-

da pelo fóton, sem massa. Esses bósons não se ligam com carga elétrica especificamente, mas a alguma carga fraca generalizada – ligam-se com neutrinos sem carga, por exemplo.

O Z não tem carga e deixa a partícula que o emitiu inalterada, como se fosse um fóton pesado.

Os dois bósons W carregam carga elétrica e alteram as partículas que os emitem ou os absorvem. Podem mudar quarks e são responsáveis pelo decaimento de quarks "*strange*" e pelo decaimento nuclear β.

. . . .

— Talvez eu consiga tornar isso mais claro. — A interrupção veio do geralmente silencioso Sabichão de Lata, que avançou com estrépito, a tela em seu peito começando a cintilar. — É preciso considerar as partículas que estão interagindo. Cada uma terá uma amplitude disseminada sobre alguma região. — Em sua tela apareceram duas regiões borradas, sobrepostas, que representavam as amplitudes das partículas. Uma região era sombreada num cinza-claro; a outra era mais escura. Isso visava exclusivamente distinguir as duas.

— Observe uma interação entre as duas partículas. Se a interação for de longo alcance, cada ponto numa amplitude será capaz de interagir com cada parte da outra. — Na figura exibida em seu peito, um conjunto de anéis em expansão apareceu de um ponto na amplitude escura e se espalhou pela tela inteira, abrangendo por completo a amplitude mais clara. Um segundo conjunto de anéis surgiu de outro ponto da distribuição escura, e também eles se espalharam por toda a região clara. Muitas e muitas vezes, círculos em expansão como esses apareceram de diferentes pontos da amplitude mais escura, e em todos os casos cobriram todas as partes da outra.

— Você vê que neste caso uma partícula está totalmente conectada com a outra. Cada parte da primeira amplitude está ciente de cada parte da outra através da interação. Se o alcance da interação for curto, é diferente.

Novamente as duas regiões borradas apareceram, e novamente uma seqüência de anéis em expansão espalhou-se a partir de diferentes pontos da distribuição escura. Desta vez, no entanto, os anéis desbotaram e desapareceram assim que deixaram seu ponto de origem. Em todos os casos, espalharam-se sobre uma fração minúscula da plena extensão da amplitude da partícula clara. A distribuição escura só estava conectada com a clara na vizinhança imediata de cada ponto de sobreposição.

— Esse é o caso do curto alcance. Uma amplitude só se conecta com outra onde elas se sobrepõem. Com uma interação de longo alcance, todos os pontos atingem todos os outros. Quando o âmbito é curto, há muito menos interação, ainda que os bósons de troca se unam com a mesma força às partes de uma amplitude que chegam a alcançar, porque são capazes de atingir apenas uma porção muito menor.

— À medida que as energias e os momentos das partículas aumentam, elas se tornam cada vez mais localizadas. São mais compactas. Uma interação de curto alcance pode cobrir mais dessas amplitudes compactas. Quando as energias das partículas aumentam, as probabilidades de interação para interações de curto e de longo alcance deixam de ser tão diferentes.

— Isso é verdade, concordou a Bruxa Fraca. — Meus bósons de troca interagem tão fortemente quanto os fótons de EM, mas são pesados. Têm uma massa grande, de modo que muito mais energia é necessária para criá-los virtualmente. Uma energia tão grande só é disponível por um período breve, mesmo em nosso Universo magnânimo. Os bósons não podem ir longe antes que seu empréstimo de energia tenha de ser devolvido, e portanto o alcance da interação é curto. Tudo isso é confirmado pela observação. Observe!

Com essa ordem abrupta, a Bruxa puxou o capuz para cobrir o rosto, arregaçou as mangas do manto e rodopiou de modo a encarar o fogo. Jogou alguma coisa em sua panela fervente, que, mais do que nunca, parecia um caldeirão. Uma coluna densa de fumaça se ergueu do líquido que estava ali dentro e enroscou-se pelo ar até assentar no tampo da mesa. Ali tornou-se mais grossa e se condensou para revelar uma pequena criatura que, após se dar conta da situação desagradável em que estava, recuou em alarme com um ruído de pequenos cascos. O recém-chegado parecia uma miniatura de cavalo com um boneco muito alinhado preso à parte dianteira. Era o Centauro de Informações, reduzido a um tamanho minúsculo.

— Oh, não, outra vez não! ele exclamou, olhando assustado para as figuras grandes que avultavam sobre ele.

— Eu o convoquei à nossa presença, pois temos necessidade de informação da terra do Cern, entoou a Bruxa formalmente, ignorando por completo a reação dele.

— Por que insiste em fazer isto comigo? gemeu o Centauro. — Por que não pode usar a Internet como todo mundo?

— Silêncio! Diga-nos o que puder sobre a dispersão de neutrinos e a natureza dos bósons intermediários.

O Centauro interpretou corretamente essa ordem contraditória e decidiu que quanto antes obedecesse, mais depressa seria capaz de retornar às suas ocupações normais.

— Certo, o que quer saber? disse, resignado.



— Mostre-nos a interação fraca quando ela já não é fraca. Mostre-nos a dispersão dos neutrinos em alta energia.

— Muito bem, respondeu o Centauro. Esboçou um retângulo no ar e ele se tornou uma janela — uma janela no espaço, que se ergueu e cresceu para exibir um salão experimental como aquele que tinham visto no Cern. No centro do salão havia um aparelho enorme, muito parecido com o que Dorothy vira instalado dentro do túnel acelerador. O Centauro explicou que aquilo era um experimento de interação de neutrinos. Embora as amplitudes dos neutrinos tivessem se tornado mais compactas nas altas energias envolvidas, isso não lhes dava grande interação com matéria pesada se comparada à interação elétrica de longo alcance de uma partícula carregada. O feixe de neutrinos podia passar facilmente através do material de blindagem em torno do acelerador e penetrar no

detector. Ali podia interagir com núcleos individuais tal como o poderia fazer um feixe de elétrons.

A janela agora mostrou uma imagem do interior do detector, muito parecida com a que Dorothy vira numa tela quando ela própria estava no Cern. A única notável diferença era que anteriormente tinha havido uma multidão de pistas cruzando a câmara à medida que partículas carregadas passavam através do detector sem nenhuma interação importante. Não havia essas pistas agora, porque os neutrinos não tinham as interações de longo alcance que eram registradas no material do detector. O volume parecia totalmente vazio, e então subitamente um grande jato de partículas projetou-se para a frente, de forma tão dramática como as que viram antes. O fato pareceu surgir do nada. Não havia nenhum sinal de qualquer partícula chegando à esquerda, porque o neutrino não deixava rastro. Então, de nenhuma fonte aparente, produziu-se aquele grande borrifo de partículas, todas se movendo para a direita com grotesco desequilíbrio.

— Esse é um evento neutrino, disse o Centauro. — Neutrinos de alta energia vão interagir prontamente.

— Mas a evidência real de uma interação de curto alcance é a liberação dos bósons de troca como partículas reais e a observação de que eles são realmente pesados, observou a Bruxa Fraca. — As massas dos bósons necessários para dar as taxas observadas de decaimento β podem ser calculadas caso se suponha que a interação é basicamente tão forte quanto o eletromagnetismo. Essas são as massas que foram observadas. Diga-lhes! ela ordenou ao Centauro.

— É verdade, ele começou. — Colisões entre um feixe de prótons e um feixe de antiprótons criaram bósons como esses. Os prótons e antiprótons são feitos de quarks e antiquarks, respectivamente. A Bruxa lhes disse como um quark *"down"* pode emitir um bóson virtual W^-, uma partícula de troca negativa, e deixar para trás um quark *"up"*. Vocês podem ver que uma colisão entre um quark *"down"* e um antiquark *"up"* pode deixar um bóson como esse sozinho. Se as partículas que colidem tiverem energia suficiente, o bóson resultante pode receber energia o bastante para produzir sua massa em repouso e ser liberado no mundo como uma partícula real. Encontraram-se bósons W tanto positiva quanto negativamente carregados, e eram muito pesados. Tinham massas cerca de cem vezes maior que a do próton. Uma massa tão enorme para seus bósons virtuais de interação confere à interação fraca um alcance *muito* curto, e um alcance tão minúsculo para a interação resulta num decaimento β aparentemente fraco. Vocês não precisam mais de mim, concluiu. — Os resultados foram integralmente relatados neste artigo.

Um novo redemoinho de fumaça surgiu, enroscando-se e torcendo-se, da panela da Bruxa Fraca e obscureceu a minúscula figura do Centauro. Quando a

nuvem se desfez, o Centauro se fora e uma publicação técnica jazia sobre a mesa da Bruxa. Dorothy inclinou-se para olhá-la, mas não conseguiu entender nada. Era técnica demais.

— É claro, observou a Bruxa Fraca, que você pode perguntar por que existem nêutrons nos núcleos atômicos. — Essa pergunta não passara pela cabeça de Dorothy, mas agora que a Bruxa mencionava a questão, supôs que devia tê-la feito. — O universo é cheio de hidrogênio, quer dizer, de prótons e elétrons, mas os nêutrons livres que estavam originalmente presentes decaíram. Se não havia nenhum nêutron prontamente disponível para ser incorporado aos núcleos, de onde vêm os nêutrons que *estão* nos núcleos? Você bem poderia perguntar isto, ela repetiu, e vou lhe responder. Primeiro, contudo, vocês todos deveriam ir lá fora e dar a volta até o fundo da minha cabana. Quando chegarem lá, devem examinar meu jardim de girasSÓIS.

Embora não pudessem ver razão alguma para aquela excursão, Dorothy e seus companheiros já tinham aprendido que discutir com as Bruxas não era uma boa política. Marcharam obedientemente para fora e, ao sair, viram as bruxas se amontoarem em torno da panela fervente. — Quando nós três vamos nos encontrar de novo? guinchou a Bruxa Fraca num retorno à esquisita personagem que incorporava. — Em aproximadamente dez minutos, eu diria, respondeu EM, hostil.

Os companheiros avançaram até os fundos da esquisita cabana. Lá descobriram que havia uma grande clareira na mata e os girasSÓIS da bruxa estavam salpicados por esse campo escuro. A terra parecia preta, embora a um exame mais atento tenham passado a duvidar de que aquilo fosse mesmo terra. Os espaços entre as flores espalhadas pareciam ser exatamente isso: espaço preto, vazio. Olharam atentamente para uma das flores mais próximas. Tinha uma cara redonda, mas em vez do amarelo pálido dos girassóis normais, essa exibia o resplendor intenso de uma luz ofuscante. Em torno desse disco central brilhante espalhavam-se largas pétalas coronais.

O grupo avançou em direção à flor e, à medida que se aproximaram, foi como se ela fosse se afastando deles constantemente. Foi ficando maior à medida que recuava, e eles reagiram acelerando sua aproximação, até que, no final, constataram que estavam numa órbita estreita em torno da superfície escaldante de uma estrela flamejante. Enquanto iam flutuando, descobriram que estavam se aproximado de um outro grupo de figuras. Eram três, com roupas tão negras quanto o espaço atrás delas, e aparentemente flutuavam diante de um escuro balão cativo. Após um instante, compreenderam que o balão era de fato a Bruxa da Massa e que as três figuras eram as outras bruxas.



— Aqui você vai testemunhar o nascimento dos átomos. As estrelas são os berços dos núcleos em redor dos quais se formam os átomos do seu mundo, afirmou a Bruxa Fraca. — Cada uma de nós desempenha seu papel nessa alquimia estelar.

Nucleossíntese: O nascimento dos elementos

Após os rápidos eventos do Big Bang, a matéria no Universo era sobretudo prótons e elétrons, combinados para dar hidrogênio e também um pouco de hélio e uma quantidade menor de deutério. Não havia nenhum carbono ou oxigênio ou qualquer dos outros elementos pesados que são necessários à nossa vida. Estes foram todos forjados nas fornalhas dos centros das estrelas.

Como é observado abaixo, as várias interações desempenham todas um papel nisso.

- A gravidade reúne matéria e libera energia potencial suficiente, à medida que a matéria cai, para aquecer o centro da estrela o suficiente para os processos nucleares.

- A interação elétrica repulsiva mantém os núcleos separados, de tal modo que eles só podem romper a "barreira elétrica" se tiverem energia muito alta. Mesmo nesse caso, reações são improváveis e o processo é lento. As estrelas duram muito.
- A força nuclear forte mantém os núcleos mais leves unidos para formar outros mais pesados, mas há muito poucos nêutrons para fazer núcleos estáveis.
- A interação fraca pode transformar alguns prótons em nêutrons. Isso fornece os constituintes para a formação de núcleos mais pesados estáveis.

Os detalhes dos processos são complexos, mas de uma maneira ou de outra os cernes nucleares de nossos elementos são fabricados numa estrela. Evidentemente, eles ainda estão no centro das estrelas, mas, nos estertores da morte, as estrelas expelem material no espaço, e após um longo tempo esse material pode ser usado na formação de um planeta, como o nosso.

É isto que as pessoas têm em mente quando dizem que "somos poeira estelar", embora talvez devêssemos dizer "cinzas de um incêndio estelar extinto".

. . . .

— O meu papel vem primeiro, começou a Bruxa da Massa. — A peça estelar começa com um espaço cheio, ainda que esparsamente, de gás hidrogênio: prótons e elétrons que perduraram desde a fundação do Universo e tiveram tempo em abundância para se emparelhar uns com os outros. Em algumas regiões, o gás pode ser um pouco mais denso, um pouco mais grosso, do que em outras. Cada átomo de gás tem uma pequenina interação gravitacional com os demais, e onde há mais gás presente, ela é mais forte. Ele atrai gases de outras regiões e se torna ainda mais denso, tornando-se ainda mais atrativo no processo. Esse processo continua numa taxa cada vez maior até que você tem os primeiros estágios de uma estrela.

A Bruxa acenou um enorme braço e uma janela se abriu contra o pano de fundo escuro do espaço. De início a janela não se distinguia muito desse pano de fundo. Mostrava uma nuvem de gás formando-se no espaço, com um número crescente de mechas ganhando forma e se movendo cada vez mais rapidamente à medida que se aproximavam umas das outras.

— À medida que é puxado para baixo pela gravidade dessa protoestrela — essa estrelazinha celeste —, o gás ganha energia. Assim como uma xícara derrubada de uma altura acima da superfície da Terra vai ganhar energia, ele se move cada vez mais depressa. Quando a xícara chega ao chão, essa energia tem de ser convertida. No caso da xícara, é usada para quebrar as ligações do material de que é feita e para produzir o som de estilhaçamento. Quando o gás que entra em uma estrela colide com o centro denso, sua energia é convertida em calor. As partículas dentro da estrela se movem mais depressa e colidem com energia

apreciável. De início, a energia nas colisões não é muito grande, e elas têm pouco efeito além da emissão de fótons. A protoestrela começa a cintilar com sua própria luz.

Na janela materializada, a massa de gás tinha realmente começado a cintilar. Não ainda com o pleno brilho do Sol, mas sua intensidade aumentava extraordinariamente à medida que uma quantidade cada vez maior de material contribuía para a energia.

— Assim como a estrela cresce e sua massa aumenta, cresce também a energia adquirida pelo hidrogênio que chega. A temperatura se eleva, e isso significa que as energias das partículas são maiores. Finalmente elas são grandes o suficiente para produzir interações nucleares.

— Meu papel é fornecer um apoio estabilizador. Mantenho as reações dentro de limites razoáveis. Mantenho o comportamento da estrela sadio e comedido, interferiu a Bruxa da Carga. — Todos os prótons transportam uma carga positiva, uma carga que está concentrada numa região minúscula. Quando ficam muito perto uns dos outros, são repelidos por suas cargas semelhantes e assim evitam uma colisão íntima que poderia produzir uma interação nuclear. Somente nas temperaturas mais elevadas alguns — muito poucos — terão energia bastante para superar a barreira dessa repulsa e ter um embate suficientemente próximo para que seus campos nucleares sejam envolvidos. Sem essa inibição, uma estrela poderia se queimar bastante rapidamente, tendo vidas que seriam mais bem medidas em minutos do que em milhões de anos. Isso poderia ser inconveniente, ela arrematou secamente.

— Quando os prótons de fato entram em estreito contato, as forças nucleares fortes podem atuar. — A Bruxa da Cor retomou o fio da história. — Mas a luta entre a repulsão das cargas elétricas nos prótons e a atração residual que pode ter escapado das forças de cor dentro deles é tão tremenda que nenhum objeto estável pode ser feito a partir de prótons somente. Você tem de ter nêutrons também, para equilibrar os estados. Mas não há nêutrons disponíveis.

— Ou não haveria, se não fossem minhas chamadas interações fracas, interrompeu a Bruxa Fraca. — Se houvesse nêutrons disponíveis, estados ligados poderiam se formar por interações fortes. Sem nêutrons, eles não podem. Se interações como essas tivessem de ocorrer, haveria liberação de energia, e é parte da termodinâmica básica da natureza que fornecer a energia cinética de partículas em movimento favorece muito a liberação de qualquer energia potencial. É essa energia que lhe dá sua luz solar.

— A interação fraca salva a situação. Lá fora no espaço livre, o nêutron tem mais energia em forma de massa do que o próton e o elétron que poderia produzir, e por isso normalmente são nêutrons e não prótons que decaem. Dentro da

fornalha intensa de uma estrela, a presença de nêutrons vai permitir a formação de estados ligados e, nesse processo, liberar energia mais do que suficiente para compensar a massa extra do nêutron. Em circunstâncias especiais como essas, o decaimento fraco procede ao contrário e os prótons podem se tornar nêutrons. Podem absorver um elétron e emitir um neutrino juntamente com o nêutron resultante, ou podem emitir um pósitron, um antielétron. Como essa entidade se destruiria com um elétron já presente na estrela, o resultado final seria o mesmo. E aí você tem, a cadeia das interações que vincula um universo de hidrogênio a um cerne estelar que incorpora os núcleos necessários para formar os átomos de que seu mundo é composto. Tudo que é preciso, então, é uma explosão para cuspir os núcleos no espaço para formar as sementes de mundos futuros. Mas essa é uma outra história.[2]

Dorothy e seus companheiros puderam ouvir um meloso coro cósmico a cantar

Ao contemplar uma estrela, atenção,
Os átomos que formam você lá estão.

Olharam à sua volta e não viram nenhum sinal das bruxas, só o brilho impessoal da fotosfera da estrela mais próxima e os pontinhos dispersos de outras estrelas distantes. Afastaram-se juntos da estrela e, enquanto caminhavam, os pontinhos distantes de luz pareceram se agrupar, mais parecendo velas na noite ou luzes de uma aldeia distante. Depois tornaram-se menos remotas, mas ao mesmo tempo muito menos claras, e só as mais próximas podiam ser distinguidas, brilhando palidamente como se através de uma bruma densa. Podiam sentir o chão sob seus pés de novo, e se deram conta de que estavam caminhando sobre lajes ao longo de uma rua indistintamente iluminada por lampiões de gás esparsos que travavam uma batalha inglória com a névoa circundante. Numa parede próxima, conseguiram ler com esforço uma placa de metal que dizia: *Rua do Castiçal.*

---

2. Essa é uma história que tenho a esperança de contar, entre outras, num futuro livro. Um título provável para ele seria *Era uma vez um Universo.*

12

Os Higgs de Masskervilles

Dorothy e seus companheiros foram caminhando pela rua tomada pela bruma até que o som de uma porta se abrindo nas proximidades atraiu-lhes a atenção. A plaquinha junto à porta anunciava tratar-se da Rua do Castiçal, número 221-A, e a porta aberta revelou uma mulher usando avental e severos trajes de criada.

— Por favor entrem, senhora e cavalheiros, ela os abordou, ignorando o fato de que os companheiros de Dorothy não se encaixavam bem nessa última categoria. — O sr. Ghardens está à espera dos senhores.

Todos a acompanharam para o interior da casa e subiram um lance de escadas. Seguiram-na de boa vontade, tanto porque sua curiosidade fora despertada quanto porque estavam satisfeitos de escapar daquela bruma cerrada. No alto da escada, sua guia abriu uma porta, pôs-se de lado e anunciou: — A senhora e os cavalheiros que estava esperando, sr. Ghardens.

O aposento estava mobiliado com certa negligência — para não dizer excentricidade — de solteirão, e continha duas pessoas. Uma era um homem robusto, com acentuada aparência militar, respeitavelmente trajado numa sobrecasaca e sentado teso numa cadeira de espaldar reto. O outro era o mais impressionante dos dois, com traços finos e aquilinos e um maxilar forte. Estava languidamente reclinado num sofá, vestindo um roupão de seda roxo que apresentava umas tantas manchas provocadas por produtos químicos. Estava folheando preguiçosamente um jornal enquanto fumava um fétido cachimbo. Ao vê-los, levantou-se.

— Ah, entrem, entrem! saudou exuberantemente os recém-chegados. — Sou Sherlock Ghardens, a seu serviço. E este é meu amigo dr. Jouleson, acrescentou apresentando o outro ocupante da sala. — Estava à sua espera. Vejo que acabam de vir da Cidade das Esmeraldas (e Rubis e Safiras), onde passaram algum tempo no monumento à Teoria de Gauge e depois vieram para cá passando pelo jardim dos girasSÓIS da Bruxa Fraca.



— Realmente, Ghardens! explodiu seu companheiro. — Isto é demais. Como é possível que saiba essas coisas?

Ghardens voltou a se sentar e começou a soltar baforadas de seu cachimbo, complacentemente. — Ora, isso não passa de um lugar-comum para qualquer pessoa que seja capaz do mínimo de dedução a partir do que seus olhos lhe mostram. Você dificilmente poderia deixar de observar a ligeira cintilação residual de vermelho, verde e azul que há neles, um sinal remanescente da exposição que sofreram a uma demonstração de forças de cor. Isso implica uma visita à cidade e, provavelmente, um encontro com a Bruxa da Cor. Você há de notar também o cuidado inconsciente que todos tomam ao andar, como se duvidassem da confiabilidade do solo plano. Essa circunspecção é invariavelmente ocasionada por uma visita ao Monumento de Gauge.

— Espantoso! exclamou dr. Jouleson. — Seu raciocínio nunca cessa de me surpreender. Mas como consegue sustentar que visitaram o jardim da Bruxa Fraca?

— Realmente, são coisas óbvias. O tempo esteve encoberto ultimamente, como de fato está quase invariavelmente por estas bandas, e no entanto você pode notar que esta jovem senhora está visivelmente bronzeada de sol e até de uma cor acobreada em certos locais em função dos efeitos das estrelas. Ela só poderia ter encontrado facilmente tal radiação no jardim dos girasSÓIS. Isso é quase trivial demais para ser mencionado.

— Mas chega desses lugares-comuns, ele continuou. — Temos de tratar do objetivo da visita desta boa gente.

Dorothy andara pensando em qual *seria* o objetivo da sua visita. Disse isso.

Ghardens arqueou uma sobrancelha fina em moderada surpresa. — Ora, certamente não preciso chamar sua atenção para o notável comportamento dos bósons sem massa da Bruxa Fraca, disse ele.

— Mas eles não são sem massa! objetou Dorothy.

— É isso que é tão notável.

— Como sabe sobre isso, Ghardens? exclamou o bom doutor, incapaz de conter seu pasmo. — Todos esses pequeninos não-sei-quê. Isso é assombroso.

Ghardens sorriu afetuosamente para o amigo. — Partículas elementares, meu caro Jouleson, respondeu sucintamente. — Procuro me manter em dia com o campo. Nunca se sabe quando informações desse tipo poderão ser úteis.

— Você me surpreende. Lembro que quando lhe contei que a Terra se move em torno do Sol você disse que iria tentar esquecer o fato assim que possível.[1]

— Bem, mudei minha maneira de pensar, retrucou Ghardens bruscamente. — Vim a me dar conta de que não há limite absoluto para a informação que o estudante diligente pode guardar na memória. De todo modo, Jouleson, deveríamos estar nos concentrando no Assunto das Misteriosas Massas Ausentes, como você provavelmente o denominaria em seus relatos desregradamente dramáticos. Sabemos, continuou, reclinando-se no sofá e unindo os dedos como se para rezar, que estamos lidando com bósons que não têm permissão para ter massa alguma e, no entanto, foram observados tendo considerável quantidade dela. Parece que, de fato, temos um problema aqui. Sabemos que algumas partículas nascem com massa; é possível, quem sabe, que algumas adquiram massa; e algumas recebem massa a contragosto. Parece-me que descobriremos que se trata desta última possibilidade.

Ghardens levantou-se, foi até uma estante no canto da sala e remexeu entre os papéis que lá estavam. — Tenho uma monografia sobre o assunto em algum lugar aqui. Foi escrita por um professor Higgs, de Edimburgo, creio. Nela ele propõe a semente de uma noção interessante — a de que partículas que fornecem os bósons de uma interação podem não ter massa própria, mas podem receber massa de outras partículas. Em conseqüência, essas partículas passaram a ser conhecidas como bósons de Higgs, em homenagem ao bom professor.

Abandonou sua busca e voltou ao seu assento. Uma vez sentado, virou-se para encarar os hóspedes com olhos claros, penetrantes. — É um erro capital teorizar sem fatos. Antes de continuarmos, consideremos alguns dos aspectos das partículas com e sem massa. Massa é equivalente a inércia. Digamos que você acelere uma partícula pesada. Nesse processo, dá a ela cada vez mais momento. De início, ela se moverá lentamente e depois ganhará velocidade constantemente, até que por fim se aproximará da velocidade da luz. Então a velocidade vai parar de crescer, embora o momento e a energia continuem se elevando. Quanto mais leve é a partícula, mais rapidamente acelerará. No final, você tem o comportamento de uma partícula sem massa alguma.

Ghardens reclinou-se e fechou os olhos, mas continuou se dirigindo à sua platéia. — Se uma partícula sem massa recebe uma quantidade qualquer de energia ou momento, ela se deslocará imediatamente na velocidade da luz. Essa é a única velocidade em que uma partícula sem massa *pode* se mover. Os fótons

1. Ghardens é retratado fazendo este comentário em *A Study in Scarlet*, sob o óbvio pseudônimo de Holmes.

não têm nenhuma massa. É por isso que a luz se propaga na "velocidade da luz". Essa velocidade não faz nenhuma referência específica à luz como tal. É a velocidade natural e única para qualquer partícula que não tem massa em repouso. Essa é a situação para partículas reais, continuou, abrindo os olhos e fitando novamente os que estavam ali reunidos com seu olhar arguto. — Para uma partícula virtual que não tem nenhuma massa inerente, não há limite particular em seu alcance. Como ela não precisa de nenhuma energia para criar sua massa em repouso não-existente, pode tomar sua energia emprestada por tanto tempo quanto queira e ir tão longe quanto queira. Como sabem, o alcance dos bósons virtuais pesados é limitado porque eles têm de devolver a energia que pediram emprestada, mas um bóson sem massa não precisa na realidade pedir coisa alguma. O alcance da interação de fótons é portanto infinito. Ela declina em força quanto mais longe de sua fonte olhemos, mas isso ocorre porque está espalhada sobre uma área cada vez maior.

— Então, para resumir, ele declarou, unindo os dedos de novo numa pose judicial, os fótons são partículas sem massa. Fótons reais se movem na velocidade da luz porque são leves, e fótons virtuais dão uma interação de alcance infinito, e no entanto... — Fez uma pausa carregada de significado. — Há circunstâncias em que a luz se desloca numa velocidade mais lenta que "a velocidade da luz", e há situações em que o alcance das interações dos fótons, de um campo elétrico, é curto — sendo muito parecido com o de uma interação de bósons pesados.

Fez uma pausa e se pôs a encher seu cachimbo de fumo. Esse era obviamente um movimento deliberado para aumentar a tensão, mas o Leão tomou-o como uma oportunidade para falar.

— Imagino que vá nos dizer..., começou.

— O paralelo é claro, atalhou Ghardens incisivamente. Dorothy ficou impressionada ao descobrir alguém capaz de fazer o Leão se calar no meio de uma frase. Ghardens estendeu o braço para o assoalho a seu lado e pegou uma grande lente de aumento. Em vez de usá-la para inspecionar alguma coisa, segurou-a para que todos a observassem. — Este útil instrumento tem uma lente que é curva, grossa no centro e mais fina em direção às bordas. A luz que passa através do vidro se move mais lentamente do que a que passa através do ar. Conseqüentemente, a luz que passa através do centro chega mais tarde do que a luz que passa através da borda da lente, e se atrasa. A interferência resultante produz uma visão distorcida de tudo que esteja do outro lado da lente — neste caso, uma visão aumentada. Por quê, vocês poderiam perguntar, a luz passa mais lentamente através do vidro? A luz, afinal, continua sendo composta de fótons, e os fótons são desprovidos de massa, não são? É porque os fótons interagem com as cargas

elétricas dentro dos átomos do vidro, e o efeito global é confundir e obstruir a passagem da luz. Embora os fótons por si mesmos só possam se mover na velocidade da luz, neste caso eles são restringidos pela pressão do aglomerado de carga que os cerca.

— É mais uma vez o efeito de outras cargas que pode atuar de modo a limitar o alcance da força elétrica. Um campo elétrico normalmente tem alcance infinito, mas se reduzirá rapidamente dentro de um condutor elétrico. Isso ocorre porque há elétrons dentro do condutor e eles são livres para se mover. Se houvesse um campo elétrico dentro do condutor, forneceria uma força a esses elétrons e eles se moveriam. Quando cargas como essas se movem, elas mudam o campo elétrico, porque cargas em posições diferentes geram campos diferentes. Os elétrons se movem até que o novo campo que fizeram cancele o campo inicial que os levou a se mover inicialmente. Nesse ponto, não há mais um campo. Não há mais força nos elétrons, e eles permanecem onde estão. O campo dentro do condutor desapareceu; foi reduzido a zero pelas cargas circundantes.

— As cargas num condutor, continuou Ghardens, soltando baforadas significativas do seu cachimbo, não podem eliminar inteiramente o campo elétrico perto da superfície, porque fora da superfície não há cargas móveis. Ao contrário, o campo se reduz rapidamente à medida que penetra o metal, exatamente como uma interação de curto alcance decresce quando se afasta de sua fonte. Mais uma vez, a presença de outras partículas fez os fótons sem massa do campo elétrico comportarem-se como se tivessem massa.

— Mas chega desta teorização, disse abruptamente. — O jogo já começou e deveríamos sair já! — Num frenesi de atividade, levantou-se do sofá, arrancou o roupão e vestiu uma capa pesada e um chapéu de abas duplas, na frente e atrás. Antes que tivessem realmente entendido o que estava se passando, Dorothy e seus companheiros tinham sido levados para fora da casa e instalados num cabriolé convenientemente à espera. Isto é, todos exceto o Leão. Como de costume, ele era grande demais para caber no veículo e seguiu correndo ao lado dele, o que deu ao cavalo que puxava o carro todo o incentivo necessário para avançar num ritmo energético. Logo estavam deixando as ruas de paralelepípedo da vila e, pouco depois, viram-se viajando a passo rápido por uma estrada rústica, através de uma charneca cada vez mais desolada.

— A massa aparente que a matéria circundante pode dar ao fóton é um tanto superficial, comentou Ghardens enquanto seguiam aos trancos e barrancos pela trilha. — Um fóton chamado "real" requer pouca energia para ser criado e ainda não tem massa em repouso. Ele pode se desvencilhar com muita facilidade dos efeitos de quaisquer cargas circundantes uma vez que deixe a região em que tais cargas estão presentes. Partículas como os bósons W e Z da interação fraca

têm uma relação mais íntima com as partículas — os bósons de Higgs — que dão massa *a elas*. Dessa relação, não há *nenhum* meio de escapar, onde quer que se vá. Esses bósons de Higgs não estão presentes somente dentro de um volume limitado de algum material. Estão presentes no vácuo, e isto quer dizer em toda parte, até *permeando* qualquer material. Quando digo "o vácuo", refiro-me a todo o espaço, quer ele venha ou não a estar ocupado pelo insignificante punhado de partículas que compõem a matéria sólida.

O cabriolé parou no meio do que parecia ser um ermo lúgubre. Ghardens abriu a porta e saltou no chão num arroubo de entusiasmo, fazendo sinal para que os outros o acompanhassem. — Cá estamos, na Charneca de Masskerville, continuou sem pausa ao pousar no chão. — Como certamente sabem, as partículas em geral podem existir brevemente no vácuo num estado virtual. Podem tomar emprestada a energia de que precisam para sua própria criação das flutuações de energia do universo quântico. Os bósons de Higgs são diferentes. São bósons, e nenhuma lei de conservação inibe sua produção. Além disso, não precisam tomar energia emprestada. Interagem uns com os outros de maneira tal que a energia envolvida na sua interação é negativa. Isso significa que sua própria presença baixa a energia do vácuo, e o universo olha com bons olhos para a energia baixa. Em conseqüência, o Higgs está sempre conosco.

— A presença do bóson de Higgs é portanto universal, um fato dado em qualquer situação. Seu efeito é parte integrante da natureza das partículas com



que interage. Quando a interação com o onipresente Higgs faz um bóson W ou Z parecer uma partícula pesada, ela produz *todas* as conseqüências que acompanham essa aparência. A interação de Higgs vai fazer com que bósons W virtuais, que são intrinsecamente sem massa, produzam forças de curto alcance, como se esperaria de partículas pesadas. Vai ainda mais longe, no entanto. É possível criar um bóson W convertendo-o de virtual em "real". Quando fazemos isso, a energia que temos de dar ao campo de Higgs é igual à energia de massa em repouso que esperaríamos de um bóson que produzisse o curto alcance observado da interação. Assim, a interação de Higgs faz novamente um bóson sem massa assemelhar-se exatamente a um dotado de massa própria.

— Mesmo quando foi liberado e se tornou uma partícula "real", o bóson W ou Z não está isento de interação com o campo de Higgs. Essa interação faz com que ele se acelere lentamente quando uma força é aplicada, como se realmente tivesse inércia. Todas as vezes, a partícula tem de avançar a custo através de um campo composto de partículas de Higgs. Este a puxa para trás e a faz recuar. É como se ela tivesse de se mover todas as vezes através de uma banheira de xarope grosso. Também deste modo, ela parece ter massa.

. . . .

O mecanismo de Higgs

Esta é uma maneira engenhosa de contornar alguns fatos desconfortáveis:

1. Só se descobriu um meio de impedir infinidades furiosas quando amplitudes de bósons virtuais se somam. Trata-se da exigência de independência da fase local, ou "simetria de gauge". Já se sabe que o campo eletromagnético satisfaz esta condição.
2. A simetria de gauge diz que os bósons de troca virtuais não devem ter massa alguma em repouso. A interação fraca tem um alcance muito curto e isso implicaria um bóson pesado.

Até agora, não se viram quaisquer bósons de Higgs livres, mas eles poderiam ser bastante pesados e necessitar de grande quantidade de energia para se libertar.

Todos estão à procura deles.

. . . .

— Não seria mais simples dizer simplesmente que o bóson W tem massa e deixar as coisas assim? interrompeu Dorothy. — Tudo isso soa implausível. É complicado demais.

— Não há essa opção. Como devem ter lhe contado na Praça dos Imortais, os *quanta* de troca dos campos têm de mostrar "independência de gauge local" como a única maneira de evitar a dispersão a infinidades descontroladas. Se minhas observações recentes lhe parecem complicadas, você não faz idéia do quan-

to *isso* seria complicado. A noção dos Higgs, embora possa lhe parecer estranha e na verdade esquisita, é a única opção disponível que parece concordar com tudo mais que sabemos. Depois que eliminamos teorias incoerentes com o conhecimento anterior, tudo que resta, por mais implausível que possa parecer, tem probabilidade de ser a verdade, encerrou Ghardens, categórico.

Em seguida levou seus companheiros a um ponto de onde se via uma grande extensão de terreno completamente plano e com um aspecto suspeitamente inocente. — Trouxe-os a uma paisagem alegórica apropriada para ilustrar o efeito dos bósons de Higgs, anunciou. Aquele é o Charco do Bóson. Está repleto de Higgs imperceptíveis que permanecem à espera para apanhar qualquer partícula desavisada. Na realidade de vocês, os Higgs estão em toda parte e todas as partículas já foram apanhadas, mas aqui podem ver as coisas de maneira mais metafórica.

— Então trata-se de uma espécie de areia movediça? Dorothy perguntou.

— Talvez haja uma semelhança superficial, mas isto é composto de Higgs e não de areia, e seu papel principal é ser lento, não rápido com a areia movediça. Observem!

Ao olharem, viram um bando de partículas aproximando-se céleres através da charneca. Agitavam-se para trás e para frente com incrível velocidade, leves e aparentemente sem massa. Em seu jogo descuidado, desviaram-se inadvertidamente para a sinistra região do Charco do Bóson. Foram capturadas imediatamente! As interações de Higgs puxaram-nas e arrastaram-nas para uma macicez indolente. Nunca mais seriam capazes de brincar alegremente. Agora estavam restringidas pelo peso sólido demais de sua ponderosa natureza.

Dorothy e seus companheiros olharam tristemente enquanto as partículas esperneavam no abraço eterno do Charco do Bóson. Dava pena ouvir seus gritos agudos. — Oh, coitadinhas! exclamou Dorothy. — Não há nada que possamos fazer por elas?

— Não, nada, respondeu Ghardens. — É o método da Natureza, e está completamente fora de nosso controle. Todos nós temos nossos fardos a carregar, e elas têm de carregar o fardo de sua própria massa. Mas agora Jouleson e eu temos de deixá-los, disse de repente. — Nossos serviços são necessários em outro lugar e posso ver que logo do outro lado da charneca há alguém com quem vocês deveriam se encontrar. — Indicou um grupinho a certa distância, apontou-lhes aquela direção e saltou de volta no cabriolé com seu fiel camarada. O cabriolé partiu rapida e ruidosamente, rumo à sua próxima exibição de observação perspicaz e análise incisiva. Dorothy e seus amigos olharam um para o outro, examinaram o grupinho distante, deram de ombros sem dizer nada e começaram a andar rumo a ele.

Quando se aproximaram, uma pessoa esplendidamente uniformizada os abordou. Brandia um punho ornamentado do qual se projetava não uma lâmina de aço, mas um pedaço de giz.

— Olá, vocês aí! exclamou. — Vieram para inspecionar nossas manobras? Sou o General Teoria e este é o Exército do Modelo Padrão. — Mostrou um grupo de cerca de 30 partículas que se agrupavam à sua volta. — Seria difícil encontrar um corpo de partículas mais excelente. De fato, foi impossível achar qualquer outra partícula. Em embates com as fileiras dos dados experimentais, elas nunca foram derrotadas até hoje. — Aqui o General Teoria curvou-se confidencialmente: — Elas não perdoam, sabe.

O general se empertigou de novo. — Formam um agrupamento de aspecto impressionante, não é?, continuou. — Aqui estão nossos mais bravos combatentes férmions. À esquerda está a infantaria lépton ligeira, com suas três gerações de léptons carregados e neutrinos. O lépton tau não é tão leve quanto poderia ser, mas procuramos não fazer comentários a respeito, cochichou como um parêntese. — Depois vocês têm os três regimentos de cor: os Vermelhos, os Verdes e os Azuis. Cada um contém seis quarks. Temos também nossa artilharia bóson, que pode fornecer uma troca bastante animada de prótons, glúons, bósons W e Z e até grávitons, como podem imaginar. Há também o departamento do quartel-mestre, com os Higgs para fornecer massa e uma seleção de constantes acopladoras apropriadas para estabelecer as regras e forças de combate. Todo o conjunto *é* um pouquinho grande e desajeitado, mas parece funcionar.

. . . .

O modelo padrão

O Modelo Padrão é um sumário do que se sabe e se acredita acerca das partículas elementares e suas interações. Fornece uma espécie de estojo de ferramentas para a construção da matéria em nosso mundo. Seus conteúdos são alguns férmions básicos: seis léptons e seis quarks (estes últimos em três cores). Para uni-los, há uma seleção de bósons para fornecer as interações: o fóton, o glúon, o gráviton e os bósons W e Z. Junto com uma seleção de constantes acopladoras e de alguns fatores de fase, esta reunião corresponde espantosamente bem aos resultados observados mediante experimentos na física das partículas, e prevê esses resultados com notável segurança e sucesso.

Os *teóricos* gostariam de encontrar alguma teoria mais básica que amarrasse o sortimento incongruente de massas e forças de interação que aparecem no modelo.

Os *experimentalistas* gostariam, para sua própria satisfação, de fazer uma mensuração que o Modelo Padrão não consiga explicar.

Até agora, ambos os grupos vêm fracassando claramente.

. . . .



— Como pode chamar este exército de grande? protestou Dorothy, incrédula. — Mal vejo como pode chamá-lo de exército. Só há um punhado deles.

O general mostrou-se bastante afrontado. — Acho que você está confundindo variedade com simples número, disse. — Quando falo "o elétron", por exemplo, estou falando da natureza comum de todos os elétrons. Partículas de qualquer tipo dado, como elétrons, não são meramente semelhantes; são *idênticas*. Essa identidade pode dar origem à simetria de troca e ao Princípio de Pauli. Como os elétrons não podem ser distinguidos uns dos outros, um *elétron diferente* é coisa que não existe. São todos a mesma coisa, absoluta e identicamente mesma, e por isso dizemos "o elétron".

— No que diz respeito a números brutos, porém, você vai considerar que são suficientes. Nossas legiões são legião. Observe uma amostra de nosso treinamento se pensa que este exército é inadequado.

A seu comando, um pequeno grupo de quarks avançou e seus integrantes começaram a girar uns em volta dos outros num padrão enroscado. Dorothy pôde ver que estavam reunidos em prótons e nêutrons. Energicamente, o elétron deu um passo à frente, saindo das fileiras dos léptons, e se integrou à mar-

cha ondulante. Agora era possível ver que as partículas tinham se combinado de várias maneiras, e claramente em números consideráveis, para formar átomos inteiros. Havia átomos de hidrogênio, de oxigênio, de carbono é claro, e até de ferro e de outros metais mais raros.

Esses múltiplos átomos convergiram então uns para os outros num turbilhão impetuoso de movimento e multiplicaram-se em números incalculáveis. Os átomos se reuniram em moléculas; combinaram-se em cristais e sólidos amorfos. A variedade e abrangência das combinações estonteava a mente e era quase impossível para os espectadores acompanhá-la. Quando a confusão de atividade finalmente se acalmou, Dorothy e seus companheiros se viram confrontados por figuras vestidas de aço escuro, não uma ou duas, mas em ordem cerrada, como os guerreiros de terracota de Xian. Estes não eram de terracota. Estavam pesadamente blindados, com grandes espadas de fio aguçado como lâmina de barbear e outras armas distribuídas sobre suas pessoas (se é que *eram* pessoas, pois os olhos que espreitavam detrás das finas fendas em seus visores pareciam estranhamente desumanos). O apinhamento daquelas grandes formas negras blindadas escureceu toda a planície, estendendo-se até o horizonte e mais além.

. . . .

O deserto experimental

A ciência, e certamente a física de partículas, depende de resultados experimentais. Não podemos determinar a natureza do universo por puro pensamento. Não teríamos imaginado muito do que descobrimos até agora. As teorias atuais das partículas básicas sugerem que qualquer dado novo só poderá ser descoberto a energias muito mais elevadas – energias que exigiriam um acelerador com o diâmetro do sistema solar.

Talvez seja difícil financiar um desses.

. . . .

— Agora talvez possam concordar que este exército é adequado para a maioria das ocasiões. Seus componentes, no entanto, revelam uma diversidade bastante preocupante. Por que exibem o estranho sortimento de massas que possuem? Talvez estas sejam fornecidas por algum tipo de processo de Higgs, mas, neste caso, por que elas têm a estranha variedade de valores que observamos? Por que há três gerações de férmions, nada mais, nada menos? Tudo isso parece estranhamente arbitrário, e buscamos por trás deste conjunto alguns princípios básicos que possam explicar a diversidade. Até agora tem sido difícil encontrar, a partir de experimentos, algum indício de que uma nova ordem seja necessária. O Modelo Padrão continua levando a melhor. Se for preciso fazer novas obser-

vações, elas devem se dar em domínios de alta energia muito acima dos que foram explorados até agora. Qualquer novo resultado deverá estar bem avançado no Grande Deserto Experimental — aquela região inóspita de energia sempre crescente em que novas observações podem se emboscar — mas, por enquanto, não há sinal de que haja qualquer um ao alcance de uma expedição experimental concebível. Meu colega oficial, Major Descoberta, partiu numa missão de reconhecimento da região, mas pode levar muito tempo até que retorne com novidades. Se é que vai voltar, acrescentou pensativo.

— Disseram-me que tenho de atravessar o deserto, então talvez possa encontrar o major, Dorothy sugeriu, esperançosa. Como o general não se mostrou muito encorajado, eles o deixaram ainda com ar pensativo e partiram em direção à linha de areia no horizonte que marcava o início do Grande Deserto Experimental.

13

Através do Grande Deserto Experimental

Mal tinham começado a cruzar o deserto, os companheiros sentiram-se oprimidos pela vasta extensão à sua frente. A areia estéril se estendia até muito longe, todos os detalhes mascarados pela cerração aterradora da energia cada vez mais alta. Cada passo no caminho foi se tornando sucessivamente mais difícil à medida que se davam conta de que tinham de chegar, de uma maneira ou de outra, à energia quase inatingível representada pelo caminho que tinham diante de si. O meio à sua volta tremeluzia com uma atividade virtual cada vez maior à medida que os níveis de energia aumentavam em geral. O ambiente pregava peças estranhas em sua visão.

— Neste lugar não estou muito certo de que acreditaria no que visse, observou o Espantalho. Não era fácil para ele confessar que até seus poderes de observação podiam não estar à altura da tarefa. — É muito possível que tenhamos miragens.

Esta observação levou todos a olharem à sua volta, e realmente observaram um pedaço de verde contra a areia amarela um pouco adiante. Quando avançaram a duras penas até mais perto, aquilo se definiu na forma de um agradável trecho gramado, com um poço no meio e algumas árvores ao lado. Sob a árvore mais alta reclinava-se um rapaz trajando um manto de seda e usando um turbante sedoso para protegê-lo ainda mais do sol. Ao seu lado estavam pousados um pão e uma botija de vinho, com que se reanimava a intervalos. Nas duas mãos ele tinha uma fileira de companheiros, dois conjuntos de partículas que o flanqueavam. Na mão direita puderam ver o conhecido conjunto de férmions e bósons: léptons e quarks, fótons e glúons, e bósons W e Z. Na esquerda, viram o conjunto dos parceiros supersimétricos. Novamente havia férmions e bósons: fotinos, gluínos, winos, sléptons e squarks. Os viajantes puderam perceber que esse personagem era na verdade a Supersimetria, agora em plena maturidade. Deitou-se com ligeira expressão de enfatuamento e relaxou nesse oásis da justificação experimental.

— Não estou muito certo de que confio nele, sussurrou o Espantalho. — Acho que pode ser nossa primeira miragem. — A cena de satisfação beatífica já estava começando a lhes parecer um bocadinho tênue perto das bordas. Dorothy e seus companheiros deram-lhe as costas, cerraram os dentes (aqueles que os possuíam) e retomaram seu lento avanço rumo ao horizonte distante.

Não tinham nenhum meio de avaliar o quanto haviam avançado quando, mais uma vez, um traço distante se tornou visível. Ao fim pôde ser visto com bastante clareza. Quando se aproximaram, já aturdidos por sua longa jornada através do Grande Deserto Experimental, tiveram a impressão de ouvir uma voz que declamava dentro das suas cabeças.

Uma vasta e infundada TOE[1] *ergue-se no deserto. Junto,*
semi-afundada na areia, jaz uma GUT[2] *aos pedaços,*
cheia dos refugos de teorias mal digeridas.
Mostram bem ambas a seus autores como seus conceitos operaram,
Explicando tudo e contudo não prevendo nada.
E no pedestal se lê: "Vejam a teoria final, primeira e única.
Contemplem minha beleza simples e rejubilem-se!"
Diante da TOE jazem prostrados os teóricos,
Adorando essa visão de seu destino.
Nada mais permanece. Enquanto outras teorias decaem
e entregam seu conteúdo à todo-poderosa TOE, tudo em torno
das areias solitárias e planas se estende a perder de vista.

Dorothy e seus amigos se entreolharam.

— É melhor nem pensar sobre isso! disse o Leão.

— Finja que não observamos isso, disse o Espantalho.

— Está além da minha capacidade de processamento, disse o Sabichão de Lata.

Sem nem parar para investigar, seguiram em sua jornada, deixando para trás a visão rígida e enigmática. Seguiram caminhando sem trégua, além dos limites da esperança e talvez de toda razão, como o Mágico os havia prevenido.

---

1. TOE, de Theory Of Everything [Teoria de Tudo]. Este é o Santo Graal das teorias unificadas. Seria uma teoria que unificasse todas as interações, entre elas a gravidade, numa grande hipótese. Não é de fácil realização. [TOE é também, em inglês, dedo do pé. (N.T.)]
2. Grand Unified Theory [Teoria da Grande Unificação]. Há uma porção delas. Seu objetivo é incluir todas as interações entre partículas, mas possivelmente excluindo a gravidade. A inclusão da gravidade produziria uma Teoria de Tudo. [GUT é também, em inglês, intestino. (N.T.)]



Um passo após o outro, sua energia aumentava com a gradualidade de uma eternidade. Mas até aquele deserto aparentemente sem fim eventualmente acabou, e eles se viram numa região nova e diferente. Estavam mais uma vez numa estrada regular, e um sinal à sua beira dizia:

Parabéns!
Vocês atingiram a Energia de Planck.
Estão a uma elevação de
10.000.000.000.000.000.000.000 MeV
(aproximadamente)

— Nunca pensei ver isto, suspirou o Leão, sua ebulição costumeira vencida pelo pasmo. — Este é o último limite. É aqui que as diferentes interações se mesclam e se tornam de igual força. Aqui é onde...

— **A gravidade se torna forte**, estrondeou uma voz que parecia vir de todos os lados à volta deles, da direita e da esquerda, mas particularmente do alto. Olharam para cima e viram a Bruxa da Massa, mas agora ela preenchia todo o campo de visão. Na presença dela, não havia mais nada *para ver*.

. . . .

Gravidade

De todas as interações conhecidas, somente a gravidade resistiu até agora às tentativas de se criar uma teoria quântica satisfatória. A gravidade é diferente das outras interações

pelo fato de distorcer o espaço e se acoplar diretamente à energia. Isso significa que, à medida que as energias das partículas aumentam, a gravidade se torna mais forte.

Em qualquer energia normal, a gravidade é extremamente fraca. Mas a energias suficientemente altas, ela será forte, e então *nada* lhe poderá resistir, porque a resistência a ela envolve alguma forma de repulsão, e a repulsão requer energia. Essa energia só faz tornar a gravidade mais forte, de modo que finalmente qualquer resistência à atração da gravidade irá de fato *ajudar* a gravidade. Esse ciclo irresistível é visto na formação de um buraco negro, em que nenhuma das outras forças que se exercem sobre a matéria é capaz de resistir efetivamente, e a gravidade esmaga estrelas inteiras – e até os corações de galáxias –, reduzindo-as a um ponto no espaço.

. . . .

— Agora estão vendo o meu pleno poder, disse ela mais moderadamente, embora ainda com um poder esmagador. — Pois sou diferente de qualquer uma de minhas três irmãs. Todas as interações delas têm suas cargas específicas — elétrica, cor, seja o que for. Essas cargas fixam de maneira final e absoluta as forças que suas interações podem exercer. A minha interação se liga diretamente à massa, e massa é energia. A baixas energias sou fraca, mas aqui, onde os níveis de energia são enormes, sou suprema. É inútil resistir a mim. Na verdade, é pior que inútil, pois qualquer tentativa de resistir à minha atração tem de envolver repulsão e a energia que a acompanha. Essa energia só aumenta a força de minha atração. Nada pode prevalecer contra mim. Até o próprio espaço é incapaz de se opor ao impacto da minha presença.

Então a Bruxa da Massa ergueu o punho e baixou-o sobre uma região do espaço vazio. No ponto que ela tinha atingido, o próprio tecido do espaço foi estilhaçado e distorcido, deixando de ser um plácido pano de fundo para as atividades da matéria. O próprio espaço borbulhou numa espécie de espuma, e buracos de minhoca o perfuraram. Essa dilaceração cataclísmica lançou Dorothy e seus companheiros violentamente à distância e a menina descobriu que estava se aproximando da contorcida entrada de um buraco de minhoca. Mesmo em meio a esse perigo tão grave, ela ficou um tanto surpresa ao observar que, na entrada do buraco, havia uma placa do metrô. Não teve tempo para refletir a respeito enquanto gritava adeus para seus companheiros e caía lá dentro.

Viu-se numa espécie de túnel e, olhando para trás, pôde ver um dos olhos da Bruxa espreitando-a pela abertura. Depois a Bruxa lhe deu uma piscadela e, quando o olho gigante se fechou, o mesmo ocorreu com a entrada do buraco de minhoca, isolando Dorothy do universo externo. Não havia nada a fazer senão ir adiante na passagem em que se encontrava.



Logo chegou a uma barreira em que se postava um funcionário uniformizado.

— Tíquete, por favor! ele disse.

— Desculpe, disse Dorothy. — De que tíquete está falando?

— Ora, seu tíquete do metrô, é claro. Espero que não o tenha perdido.

Dorothy procurou em seus bolsos e descobriu que de fato ainda tinha o tíquete que comprara ao iniciar a viagem com a tia e o tio. Estendeu-o e o coletor de tíquetes perfurou-o.

— Isto é mesmo parte do metrô? ela perguntou, achando difícil acreditar naquilo.

— Oh, com certeza. A maioria das pessoas fica surpresa ao descobrir o quão longe o metrô vai além do centro da cidade. Espero que tenha aprendido uma lição importante na sua viagem.

— Ah, sim. Aprendi como o mundo cotidiano em que vivo está fundado no estranho e maravilhoso comportamento de incontáveis e minúsculas partículas e suas espantosas interações.

— Bem, certo. O que eu tinha em mente era mais a lição "Não perca seu tíquete do metrô", mas essa outra é certamente uma lição da maior importância. De todo modo, faça uma boa viagem.

Dorothy caminhou até a plataforma, na qual encontrou um vagão vazio à sua espera. Entrou nele e descobriu que estava cheio daquele sentimento semimelancólico de solidão que invade os vagões quando chegam a um terminal distante. Escolheu um assento, sentou-se e esperou.

O carro do metrô deu uma guinada brusca...

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer ao Cern* a permissão para usar figuras tomadas de sua página na Web como material de fundo em algumas de minhas ilustrações.

Gostaria de assinalar que o totalmente mítico Reino de Cern, que inventei para discutir a proliferação das partículas elementares em meados do século XX, tem pouca semelhança com o laboratório Cern real, que agora enfrenta com seriedade os desafios da física do século XXI.

Há muito poucos centauros no Cern.

*Laboratório Europeu para a Física de Partículas. (N.T.)

Robert Gilmore escreveu dois outros livros de gênero semelhante: *Alice no País do Quantum*, publicado no Brasil por Jorge Zahar, e *Scrooge's Cryptic Carol*, publicado nos EUA pela Copernicus.

Não parece haver muitos livros novos sobre física de partículas para o leitor leigo. A informação atual pode ser mais bem encontrada na Internet. Como esses *sites* vão mudar de tempo em tempo, minha intenção é listar alguns em meu próprio *site*

www.phy.bris.ac.uk/allegory.

Pouco depois da publicação do livro, costumo pensar em coisas que gostaria de ter incluído. Todas essas idéias tardias e outros materiais que eu sinta o desejo de compartilhar serão também incluídos no meu *site*.

Índice Remissivo

O índice não arrola cada ocorrência de uma palavra. Mostra onde os conceitos são introduzidos ou explicados.

Este livro foi composto por Textos & Formas, em Agaramond e Libre Semi Serif, e impresso por Cromosete Gráfica e Editora em fevereiro de 2001.

apreciar as obras de Shakespeare ou de Machado de Assis porque não passam de palavras. Tudo depende do que é feito com as palavras ou os átomos.

Quer esteja descrevendo a constante de Planck, a superposição, o tunelamento ou os quarks e os léptons, Gilmore é um mestre na arte de tornar compreensíveis e divertidos os difíceis conceitos da física.

ROBERT GILMORE é professor de física na Universidade de Bristol, na Inglaterra. Trabalhou também com física de partículas em Brookhaven, Stanford e no Cern, em Genebra. Seus livros anteriores são *Alice no País do Quantum: a física quântica ao alcance de todos* (Jorge Zahar, 1998) e *Scrooge's Cryptic Carol.*

